

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**METODOLOGÍAS PARA LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA
DE CENTRALES DE BIOMASA Y MINIHIDRÁULICA
COMO RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES
EN LA COMARCA DE EL BIERZO**



Autor: Carlos de la Paz Blanco

Directores: María Eugenia Pérez González

Javier Domínguez Bravo

Máster en Tecnologías de la Información Geográfica

Curso 2011/12

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



AGRADECIMIENTOS

*A Diego, Trini y mis padres por su paciencia este último año,
y a María Eugenia y Javier por el apoyo y conocimientos prestados para este trabajo.*

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. ESTADO DEL ARTE Y JUSTIFICACIÓN	5
2.1. LEGISLACIÓN.....	6
2.2. BIOMASA.....	6
2.3. MINIHIDRAÚLICA	7
2.4. ELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	8
3. OBJETIVOS	10
4. RECURSOS Y FUENTES	11
4.1. RECURSOS.....	11
4.2. FUENTES	11
5. METODOLOGÍAS.....	13
5.1. METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE BIOMASA	13
5.2. METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE MINIHIDRAÚLICA	17
6. PROCESOS Y RESULTADOS	19
6.1. PROCESOS Y RESULTADOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE BIOMASA.....	19
6.1.1 Factores para la estimación de zonas aptas para el aprovechamiento de la Biomasa Forestal	19
6.1.2 Asignación de Pesos a cada Factor	23
6.1.3 Suma Lineal Ponderada.....	24
6.1.4 Restricciones de áreas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal	25
6.1.5 Intersección del conjunto de Restricciones para el aprovechamiento de Biomasa Forestal	28
6.1.6 Resultado de las Zonas Aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal (DEMANDA).....	29
6.1.7 Resumen del Proceso Parcial para la obtención de las Zonas Aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal (DEMANDA).....	30
6.1.8 Restricciones de áreas para las instalaciones de Biomasa Forestal.....	31
6.1.9 Intersección del conjunto de Restricciones de áreas para las instalaciones de Biomasa Forestal..	34
6.1.10 Resultado de los Emplazamientos para las Instalaciones de Biomasa Forestal (OFERTA)	35
6.1.11 Resumen del Proceso Parcial para la obtención de los Emplazamientos de Instalaciones de Biomasa Forestal (OFERTA).....	36
6.1.12 Obtención de soluciones mediante modelos de Localización–Asignación (Análisis de Redes)....	37

6.2. PROCESOS Y RESULTADOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE MINIHIDRÁULICA	41
6.2.1 Obtención del Factor Principal (Caudal o Flujo Hidroeléctrico Potencial) para la selección de emplazamientos de Centrales de Minihidráulica	41
6.2.2 Obtención de los Factores Comunes para la selección de emplazamientos de Centrales de Minihidráulica.....	48
6.2.3. Asignación de Pesos a cada Factor	51
6.2.4. Suma Lineal Ponderada	52
6.2.5. Restricciones de emplazamientos para las Centrales de Minihidráulica.....	53
6.2.6. Intersección del conjunto de Restricciones de emplazamientos para las Centrales de Minihidráulica.....	55
6.2.7. Resultado de Emplazamientos Óptimos para la Instalación de Centrales de Minihidráulica	55
6.2.8. Resumen de los Procesos de obtención de los Emplazamientos para Instalaciones de Minihidráulica.....	58
7. CONCLUSIONES	60
8. BIBLIOGRAFÍA	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estratos del IFN y Cabida para la comarca de El Bierzo	20
Tabla 2. Superficies (ha) y Biomasa Forestal (t ms/ha año) para la comarca de El Bierzo	20
Tabla 3. Relación Pendientes (%) y Eficiencia de Extracción de Biomasa (%)	22
Tabla 4. Pesos asignados a cada factor en la Metodología de Biomasa	23
Tabla 5. Capacidad de acogida de los usos del suelo para las instalaciones	33
Tabla 6. Modelos de Metodología para la localización de Centrales de Biomasa	41
Tabla 7. Estaciones Meteorológicas con datos de pluviometría media anual	43
Tabla 8. Hábitats de Interés Comunitario y su Código	50
Tabla 9. Pesos asignados a cada factor en la Metodología de Minihidráulica	51

1. INTRODUCCIÓN

El sistema energético mundial se basa fundamentalmente en la obtención de energía a partir de **combustibles fósiles** como el petróleo, el gas y el carbón mineral, que generan un incremento de los niveles de CO₂ en la atmosfera, provocando graves efectos medioambientales como el **efecto invernadero** y el **calentamiento global**. Además, estos recursos son limitados y están ubicados en zonas concretas del planeta, lo que provoca grandes desigualdades económicas entre los países que poseen reservas de combustibles fósiles y los que no.

En este escenario energético, una apuesta por el uso de **energías renovables** puede mejorar los efectos negativos de los combustibles fósiles sobre el medio ambiente. Además, el empleo de un amplio rango de fuentes naturales inagotables de las diferentes energías renovables (Biomasa, Eólica, Geotérmica, Marina, Minieólica, Minihidráulica, Solar), favorece la seguridad del suministro energético debido al aumento de la diversidad energética por un lado y la disminución de la dependencia energética con el exterior por otro (Domínguez, 2002), y en definitiva a un reparto energético más equitativo entre países.

En este trabajo se destacan dos energías renovables con futuro, bien porque todavía no se ha aprovechado todo su potencial energético como ocurre con la **Biomasa forestal**, o bien por ser una tecnología consolidada y eficiente, pero que todavía tiene un potencial aún sin explotar, de carácter sostenible como ocurre con la energía **Minihidráulica**, que puede aprovechar el potencial energético de los recursos hídricos manteniendo la calidad ambiental del entorno. También debemos resaltar la aportación sobre el desarrollo socioeconómico rural de estas dos energías renovables, puesto que ambas utilizan recursos que se encuentran en este medio, como son los residuos forestales (Biomasa forestal), y las pendientes y los cursos de agua (Minihidráulica), mejorando las condiciones de vida y empleo, a la vez que se realiza un uso sostenible de estos recursos naturales.

La **valoración del recurso**, es el paso previo dentro del dimensionado de instalaciones o sistemas que aprovechan algún tipo de fuente energética:

Biomasa forestal: En este caso el recurso utilizado son los **residuos forestales** generados en las operaciones silvícolas de limpieza, poda y cortas parciales o finales de los montes que pueden ser utilizados como combustibles orgánicos en aplicaciones eléctricas, térmicas y/o de co-combustión (IDAE, 2007). La estimación de la biomasa forestal arbolada se basa en estudios y aplicaciones de bases de datos nacionales actualizados, como es el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN, 1986-1996), y el Mapa Forestal (MFE50, 2007). Sin embargo, el conocimiento de la cantidad potencial de residuos forestales existente en el territorio no es el único factor para

determinar la viabilidad de utilización de este recurso en aplicaciones energéticas (Domínguez, 2002; Velázquez, 2006). Existen otros factores destacados de índole espacial que también inciden de forma decisiva en su aprovechamiento, por cuanto determinan el coste de la extracción del recurso, como la pendiente, la distancia a la red de transporte, así como otros condicionantes ambientales.

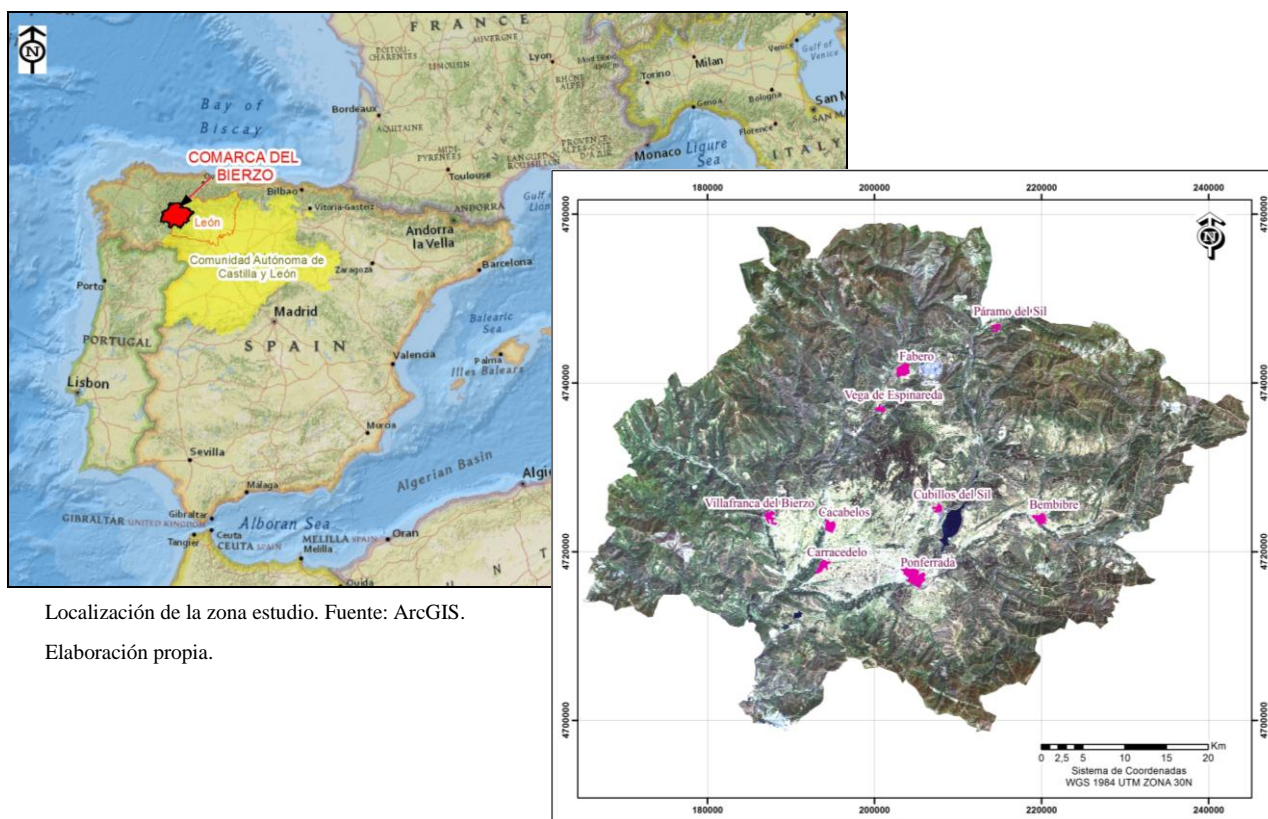
Minihidráulica: Esta tecnología necesita para generar electricidad, un determinado caudal y un cierto desnivel. Se entiende por caudal la **masa de agua** que pasa en un tiempo determinado por una sección del cauce, y por desnivel o salto bruto a la distancia medida en vertical que recorre la masa de agua, que equivale a la diferencia de nivel entre la lámina de agua en la toma y en el punto donde se restituye al río el caudal ya turbinado (ESHA, 2006). La estimación de caudales se puede obtener con mediciones en campo, que podemos obtener en las Confederaciones Hidrográficas, aunque no siempre presentan la densidad necesaria, por lo que se suele acudir a técnicas de interpolación en muchas ocasiones.

Por otro lado, es imprescindible un estudio exhaustivo de la **localización del emplazamiento**, que en el caso de la tecnología Mini-hidro está asociado espacialmente al recurso (caudal), además de depender de otros factores técnicos (desnivel, proximidad a red eléctrica, etc.) y ambientales (espacios protegidos). Sin embargo, en la biomasa forestal el recurso a aprovechar presenta una dispersión territorial y una escasa densidad energética, por lo que se requiere un estudio en el que se relacionen la demanda del recurso y la oferta de localizaciones para las instalaciones.

De todo ello se deduce, una componente fundamentalmente espacial en relación con ambas Energías Renovables. La localización de emplazamientos para las instalaciones de las dos tecnologías presenta limitaciones que están relacionadas con sus características geográficas. Un buen conocimiento de las fuentes o recursos energéticos y de las necesidades técnicas de sus emplazamientos, así como del impacto sobre el medio ambiente, establecerá una localización óptima y una buena integración en el medio de estas instalaciones. En este sentido, las **Tecnologías de la Información Geográfica (TIG)** son una herramienta idónea, puesto que permiten analizar la complejidad y variedad tecnológica de estos recursos y definir los factores más relevantes desde el punto de vista del territorio.

Para encuadrar este trabajo en un lugar concreto, se ha optado por la selección de una comarca de la provincia de León, **El Bierzo**, que dispone de unas condiciones óptimas, en cuanto a situación se refiere para albergar ambas tecnologías, por ser una zona que presenta una extensa superficie de recursos forestales, así como de una red hidrológica con un elevado caudal de agua en un área de gran variabilidad altitudinal. Además, El Bierzo ha sido una comarca energética tradicional, basada en la minería del carbón, por lo que puede ser interesante una conversión hacia otras alternativas energéticas

renovables que incentiven el desarrollo socioeconómico de la comarca de forma sostenible y con mayor respeto al medio ambiente.



Localización de la zona estudio. Fuente: ArcGIS.

Elaboración propia.

Imagen Landsat de la comarca de El Bierzo. Fuente: IGN. Elaboración propia.

2. ESTADO DEL ARTE Y JUSTIFICACIÓN

El consumo de energía, incluyendo el transporte, es en la actualidad la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes acidificantes. Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), la emisión de estos últimos contaminantes se ha reducido de un modo significativo gracias a la adopción de combustibles más limpios y al tratamiento de los gases de combustión. Pero mientras no disminuya el protagonismo de los combustibles fósiles en la cesta energética, los gases de efecto invernadero que provocan el cambio climático parecen estar abocados a aumentar. Mayor eficiencia energética y un incremento del uso de las **energías renovables** son vistos como parte de la solución (CIEMAT).

En la actualidad el carbón sigue siendo la principal fuente de energía, y la hidráulica la más abundante dentro de las energías renovables (CIEMAT), aunque la mayor parte de esta energía hidráulica procede de saltos generados mediante grandes embalses causantes de la pérdida de importantes ecosistemas, pueblos, vegas de cultivo, paisajes singulares y construcciones de alto valor cultural. En

este sentido, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) considera que las centrales de Minihidráulica generan un **impacto ambiental mínimo**, siendo una tecnología energética por explotar.

Hoy en día, las energías renovables, aparte de respetar el medio ambiente, constituyen una importante fuente de **creación de empleo**. Según las previsiones, la energía que reportará más puestos de trabajo es la energía procedente de la biomasa (CIEMAT).

El respeto por el medio ambiente y la creación de empleo, así como el hecho de ser dos energías renovables a **pequeña escala**, han motivado la elección de la Biomasa Forestal y la Minihidráulica para este trabajo. En los siguientes apartados se comentan las características más significativas de estas dos energías, su desarrollo potencial en la zona de estudio, así como la legislación actual al respecto.

2.1. LEGISLACIÓN

Atendiendo a la legislación actual sobre producción de energía eléctrica, se establece como instalaciones de pequeña escala para este trabajo, aquellas que generan una **potencia eléctrica inferior a 10 MW**. A continuación se hace referencia de la legislación española en este sentido:

Real Decreto 1565/2010, de 19 de noviembre, por el que se regulan y modifican determinados aspectos relativos a la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial (BOE nº. 283 de 23/11/ 2010), que establece la obligación de adscripción a centros de control que actuarán como interlocutores del operador del sistema para las instalaciones de potencia igual o superior a 10 MW.

Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial (BOE nº 127, de 28/05/2007), que considera mini- hidráulica a aquellas instalaciones que tengan una potencia instalada menor o igual a 10 MW.

La Legislación de otros países de la Unión Europea (Portugal, Irlanda, Grecia y Bélgica), así como normativas de la Comisión Europea, la ESHA (European Small Hydropower Association) y la UNIPEDE (Unión Internacional de Productores y Distribuidores de Electricidad), consideran "pequeñas" todas las centrales hidroeléctricas cuya potencia instalada no supere los 10 MW (ESHA, 2006).

2.2. BIOMASA

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), utiliza la definición de la Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588 para catalogar la "biomasa" como "todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo

un proceso de mineralización”. La combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero porque el carbono que se libera forma parte de la atmósfera actual (es el que absorben y liberan continuamente las plantas durante su crecimiento) y no del subsuelo, capturado en épocas remotas, precisamente como el gas o el petróleo.

Hay varios tipos de biomasa utilizables como fuente de energía, distinguiéndose los que corresponden al entorno forestal de los del agrícola. La biomasa de origen forestal permite diversas clasificaciones, según proceda de cortas de masas no comerciales, de restos de corta de otras especies comerciales o de residuos de las industrias forestales (serrerías, polvo de lijado, etc.). La agrícola también presenta diferentes orígenes (orujo, paja, cardo, maíz, etc.) e igualmente aporta residuos de sus industrias (alpechines, cáscaras de frutos secos, harineras, etc.). Por último, también se obtiene biomasa de cultivos energéticos, tanto forestales (chopo, eucalipto, paulonia, acacia, sauce, etc.) como agrícolas (sorgo, colza, etc.).

Para este trabajo se contempla exclusivamente como fuente de energía la biomasa forestal residual, que al igual que el resto de recursos proveedores de biomasa, presenta la ventaja de su **disponibilidad constante** frente a otras renovables de carácter más variable como la eólica, ya que la biomasa conserva su energía hasta el momento de su utilización. Esta propiedad hace que la biomasa sea la energía renovable más fácil de gestionar, permitiendo crear un stock energético para los momentos en que las otras fuentes, no se encuentren disponibles (Jarabo, 1999; Lorente, 2009). Otra ventaja que conlleva el uso de la biomasa forestal residual es la **reducción de riesgos de incendios forestales** y de plagas de insectos y los gastos asociados a su prevención y extinción. Por el contrario, uno de sus principales inconvenientes frente a otras energías de este grupo, que limita su desarrollo y utilización, es su escasa concentración espacial, su ubicación en terrenos de difícil accesibilidad (IDAE, 2005; IDAE, 2007), así como la actualización de la información sobre nuevas superficies reforestadas. Por este motivo, el conocimiento de la disponibilidad de este recurso resulta prioritario de cara a conocer la viabilidad de proyectos que los pretendan utilizar (IDAE, 2005; IDAE, 2007; Esteban et al., 2008).

2.3. MINIHIDRAÚLICA

Las instalaciones hidroeléctricas a pequeña escala tienen un gran potencial para promover el desarrollo económico y la autosuficiencia en zonas rurales, sin afectar las culturas locales ni el medio ambiente.

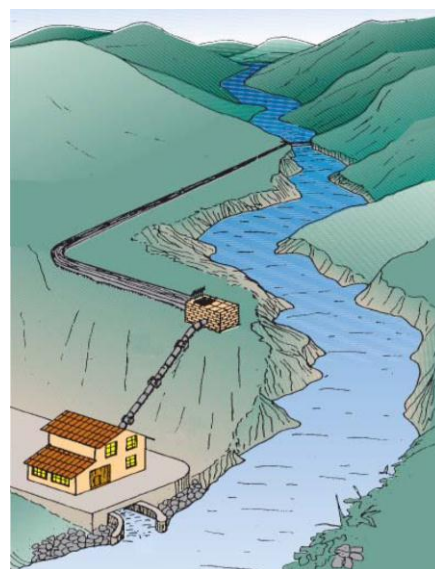
Desde los comienzos de la producción de electricidad, la hidráulica ha sido, y sigue siendo, la **primera fuente renovable** utilizada para su generación. Hoy en día la hidroelectricidad – la suma de la convencional y de la pequeña – representa, en la Unión Europea, de acuerdo con las cifras del Libro Blanco, el 13% del total, reduciendo consiguientemente en más de 67 millones las toneladas de CO₂

emitidas por año. Ahora bien, así como los aprovechamientos hidroeléctricos convencionales, en los que la importancia de la obra civil y la necesaria inundación de grandes áreas para embalsar el agua y crear la necesaria altura de salto, dan lugar a importantes impactos en el entorno, los pequeños aprovechamientos se integran fácilmente en el ecosistema más sensible (ESHA, 2006).

El objetivo de un aprovechamiento hidroeléctrico es convertir la energía potencial de una masa de agua situada en un punto (el más alto del aprovechamiento) en energía eléctrica, disponible en el punto más bajo, donde está ubicada la instalación de máquinas. La potencia eléctrica que se obtiene en un aprovechamiento es proporcional al caudal utilizado y a la altura del salto.

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar, en dos tipos, de caudal fluyente (de derivación) y centrales hidroeléctricas con caudales en parte retenidos.

Este trabajo está orientado a la localización de enclaves para la instalación de centrales que trabajan con caudal fluyente, puesto que es la instalación hidroeléctrica más frecuente en aquellas centrales de mediana y pequeña potencia. Además, este tipo de centrales tiene un impacto en el medio ambiente mínimo, ya que no bloquea el cauce del río, y no inunda los terrenos adyacentes. Este tipo de aprovechamientos constan de una bocatoma donde captan parte del caudal del río. El caudal se conduce a través de canales a la turbina para aprovechar la energía del agua y después devolverla al cauce del río.



Esquema de central de agua fluyente. Fuente: EVE

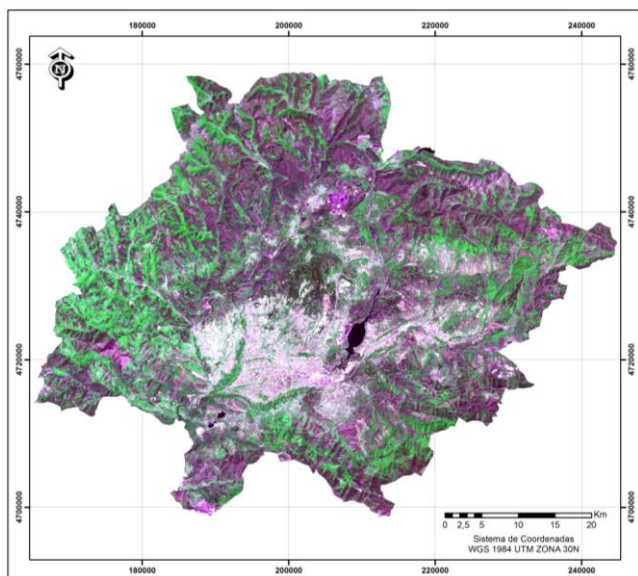
2.4. ELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El motivo fundamental por el que se ha seleccionado la comarca de El Bierzo para encuadrar este estudio es porque dispone, de forma notable, de los recursos naturales de los que se nutren las energías renovables estudiadas: Masas Forestales (Biomasa) y Caudales Fluviales y Pendientes (Minihidráulica).

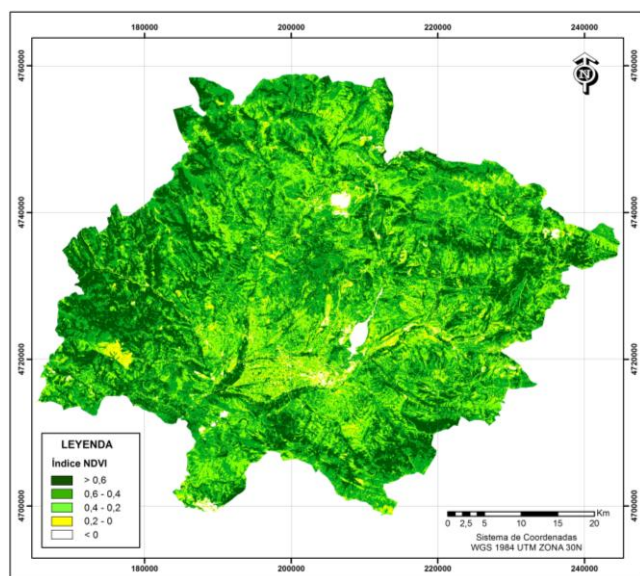
La comarca de El Bierzo se sitúa en el cuadrante noroeste de la Península Ibérica presentando un clima marcado por una cierta influencia atlántica y por la configuración de sus montañas, dispuestas en forma de herradura con salida por el Suroeste. Las precipitaciones son abundantes y la temperatura es suave, todo ello matizado por la altitud.

Bajo esta singularidad climática habitan gran número de especies forestales atlánticas junto con especies del clima mediterráneo. Las especies que destacan son los encinares y rebollares que ocupan

gran parte del paisaje berciano, así como las masas de coníferas que se sitúan en su mayoría en la parte central de la comarca. Mediante la visualización y análisis de imágenes de satélite y de aplicaciones de mejoras espectrales como el Índice de Color Natural y el NDVI, podemos comprobar que El Bierzo presenta una importante superficie forestal y por tanto, un gran potencial para la Biomasa:



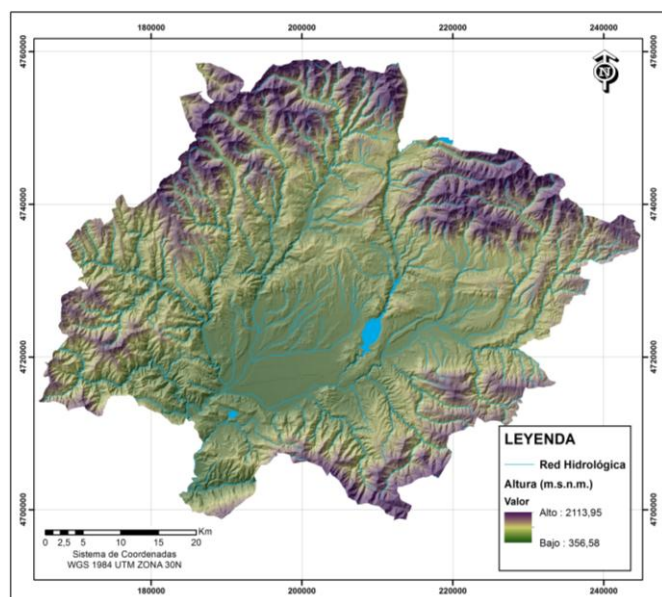
Índice de Color Natural. Fuente: IGN. Elaboración propia.



NDVI. Fuente: IGN. Elaboración propia.

El Índice NDVI se ha clasificado en 5 categorías, que van desde los valores menores a 0 (zonas sin vegetación, masas de agua y suelo desnudo); hasta los valores por encima de 0,6 que corresponde a la vegetación que presenta mayor vigor (frondosas). Entre 0 y 0,2 se incluirían los cultivos de secano, mientras que las coníferas se encuadrarían entre los valores de NDVI de 0,4 y 0,6.

Como se ha mencionado antes, El Bierzo presenta un relieve irregular, de fuertes pendientes, con un rango altitudinal que varía desde los 350 m a los 2.150 m aproximadamente. Este factor unido a su importante red hidrológica, que tiene en el río Sil su principal arteria fluvial, hacen de esta comarca una zona propicia para el aprovechamiento hidroeléctrico. Este hecho se refleja en el siguiente mapa en el que se incluye el Modelo Digital del Terreno (MDT) y la red hidrológica de la zona de estudio:



Altimetría y red hidrológica. Fuente: IGN. Elaboración propia.

3. OBJETIVOS

El **propósito principal** de este trabajo es la localización de zonas óptimas para la instalación de centrales de Biomasa Forestal y Minihidráulica que puedan generar energía eléctrica y estén conectadas a la red. Para ello se han concebido distintas metodologías basadas fundamentalmente en técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), donde a partir de diferentes datos se obtienen factores y restricciones que afectan a cada una de las Energías Renovables objeto de estudio.

Para lograr el objetivo principal se han alcanzado una serie de objetivos parciales que conforman la metodología aplicada a cada Energía Renovable:

Biomasa Forestal:

- Obtención de las zonas que presentan mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso (**demanda de biomasa forestal**), mediante una Evaluación Multicriterio. Con esta técnica se tienen en cuenta distintos factores importantes para la elección de estas zonas, como las características de las masas forestales, la orografía del terreno y la existencia de las infraestructuras, así como las restricciones técnicas y ambientales que afectan a estos factores.
- Obtención de enclaves idóneos para el emplazamiento de centrales de Biomasa Forestal (**oferta de localizaciones para las instalaciones**) mediante una Evaluación Multicriterio Booleana. En este método todos los criterios considerados (técnicos y ambientales) para la selección de estas áreas, son restricciones y el resultado es su intersección.
- Distintas soluciones para la ubicaciones de centrales de biomasa forestal a partir de un **modelo de localización-asignación con análisis de redes** en el que se relacionan la demanda del recurso y la oferta de localizaciones para las instalaciones.

Minihidráulica:

En el caso de la Tecnología Mini-hidro también se ha perseguido la obtención de **zonas con mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso** (cursos de agua en zonas con cierto desnivel). Para ello se han originado 2 metodologías o modelos de Evaluación Multicriterio, cuya diferencia sustancial se basa en los datos de inicio y herramientas aplicadas para estimar el recurso energético:

- Modelo generado a partir de **datos de caudal** obtenidos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil.

- Modelo generado a partir de **datos pluviométricos** obtenidos de estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y del **modelo digital del terreno** de la zona de estudio, aplicando herramientas de hidrología del software ArcGIS.

4. RECURSOS Y FUENTES

4.1. RECURSOS

Como herramienta fundamental para la gestión, análisis y representación de las distintas bases de datos y capas de información gráfica manejadas en este trabajo se ha utilizado **ArcGIS 10**, un software perteneciente al campo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Además, para el tratamiento puntual de imágenes procedentes de satélite se ha empleado el software **ERDAS Imagine 2010**, ampliamente usado en el área de la Teledetección.

4.2. FUENTES

Como se ha mencionado anteriormente, la zona de estudio se sitúa en la comarca del Bierzo (León). La proyección utilizada en el estudio es la “*Transverse Mercator*” y el sistema de coordenadas el “WGS 1984 UTM Zone 30N”.

Las bases de datos y capas de información gráfica utilizadas en este trabajo han sido obtenidas de diferentes fuentes de información:

Para este trabajo se ha contado con la inestimable colaboración del Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica y Energías Renovables (gTIGER) y del Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER) de Soria, pertenecientes ambos al **Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas** (CIEMAT, Ministerio de Economía y Competitividad). Las bases de datos y capas temáticas proporcionadas por el CIEMAT son:

- Mapa Forestal Español 1:50.000 (2006) en formato *shapefile*.
- Base de datos del Inventario Forestal Nacional 3 (1997 - 2007).
- Red eléctrica y Subestaciones eléctricas en formato *shapefile*.

Del **Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional** (IGN, www.ign.es) se han obtenido las siguientes capas de información:

- Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio con un paso de malla de 25 m. en formato *ascii*. El MDT es un mosaico compuesto de las siguientes hojas: MDT25-0099-H30.asc; MDT25-0100-H30.asc; MDT25-0101-H30.asc; MDT25-0102-H30.asc; MDT25-0125-H30.asc; MDT25-0126-

H30.asc; MDT25-0127-H30.asc; MDT25-0128-H30.asc; MDT25-0157-H30.asc; MDT25-0158-H30.asc; MDT25-0159-H30.asc; MDT25-0160-H30.asc; MDT25-0190-H30.asc; MDT25-0191-H30.asc; MDT25-0192-H30.asc y MDT25-0193-H30.asc.

- Límites administrativos de CCAA, provincias y municipios en formato *shapefile*.
- Infraestructuras del transporte: red de autovías, carreteras y pistas forestales del ámbito de estudio en formato *shapefile*.
- Usos del suelo: Corine Land Cover 2006 en formato *shapefile*.

Otra importante fuente de información es la Infraestructura de **Datos Espaciales (IDE) de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil** (CHMS, www.chminosil.es), de donde se han obtenido las siguientes capas de información:

- Ejes de los Cauces de la red hidrográfica a escala 1:25.000 en formato *shapefile*.
- Puntos de caudales de la red hidrográfica en formato *shapefile*, que incluyen datos de caudales medios y caudales mínimos con una probabilidad del 90%.
- Espacios Naturales Protegidos de la zona de estudio en formato *shapefile*.

Del servicio cartográfico del **Banco de Datos de la Naturaleza del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente** (<http://www.magrama.gob.es>) se ha obtenido las siguientes capas de información y bases de datos:

- Hábitats de Interés Comunitario del Anexo I de la Directiva 92/43/CEE a escala 1:50.000 (1997) en formato *shapefile* (cartografía) y la tablas de relación en mdb.

Del **Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA)** del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (<http://www.magrama.gob.es>) se ha obtenido la siguiente información:

- Datos de Pluviometría media mensual de estaciones de la zona de estudio, elaborados a partir de series de datos pluviométricos entre 1960 y 1996, facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

Para la obtención de imágenes de satélite se ha recurrido al servicio multi-usuario que dispone la facultad de Geografía e Historia de la Universidad Complutense de Madrid con licencia para descargar del **Geoportal del Plan Nacional de Teledetección** del IGN este tipo de información gráfica:

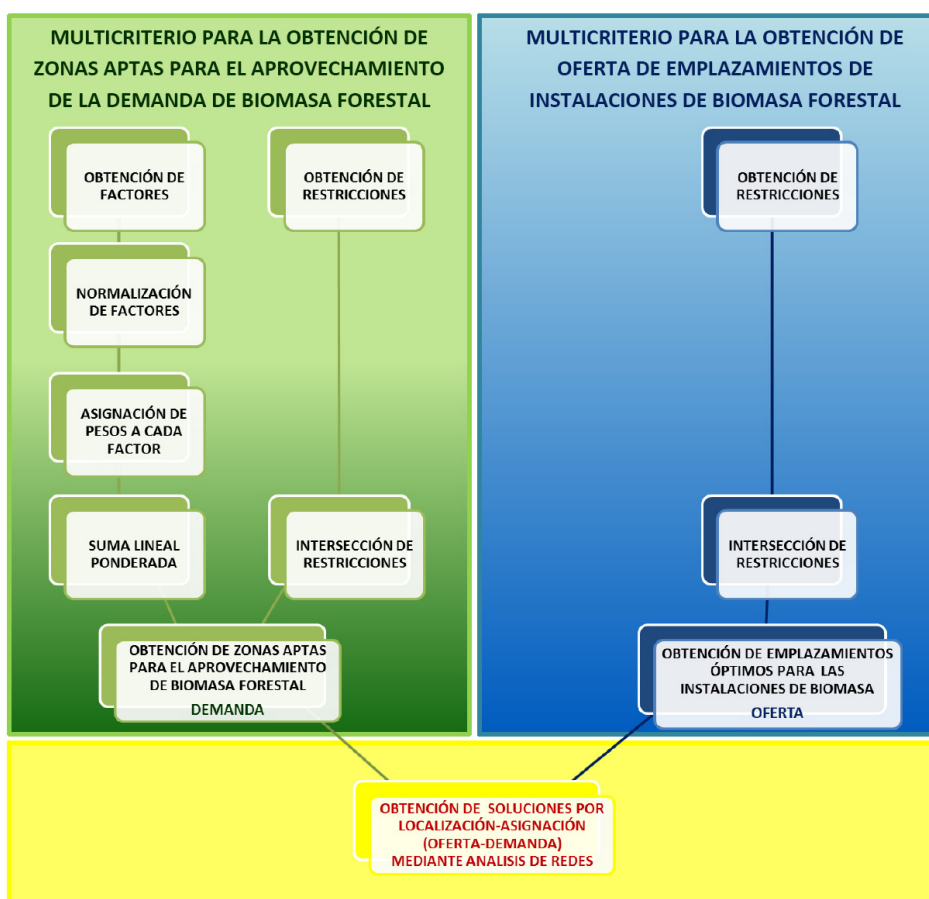
- Imágenes Landsat 5 TM de junio de 2011 de la zona de estudio:
 - `pnt_landsat5_tm_203030_20110624_geo_xsbic_etr89_hu30_gsd25_std`
 - `pnt_landsat5_tm_203031_20110624_geo_xsbic_etr89_hu30_gsd25_std`

5. METODOLOGÍAS

Para localización de zonas óptimas para la instalación de centrales de Biomasa Forestal y Minihidráulica se han seguido metodologías diferentes, aunque ambas basadas en la Evaluación Multicriterio mediante operaciones de análisis con formatos *raster*.

5.1. METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE BIOMASA

La biomasa forestal es un recurso que presenta dispersión territorial y una escasa densidad energética, por lo que se debe diferenciar por un lado las zonas con mayor aptitud para el aprovechamiento de la demanda de biomasa forestal, y por otro lado la oferta de emplazamientos potenciales para las instalaciones donde explotar el recurso. Tanto la estimación del recurso como la selección de los emplazamientos para las instalaciones requieren de un análisis multicriterio propio que se describe en el siguiente esquema:



Como se puede observar en el esquema anterior la metodología presenta una serie de pasos hasta lograr el objetivo final que se describen a continuación:

1. Obtención de factores

Los “factores” son aspectos que aumentan o disminuyen la valoración de una alternativa como solución al problema, pueden ser cuantitativos u cualitativos. En principio, se han establecido factores tanto de tipo técnico como ambiental. Estos factores tendrán un formato *raster*, es decir, si la información gráfica que se dispone es vectorial, habrá que transformarla a este formato *raster* (Tamaño de celda/píxel 100 x 100 m.), para posteriormente poder realizar el análisis multicriterio.

Mediante la consulta de distintas fuentes del campo de la Biomasa Forestal, se han propuesto una serie de condiciones que transformaremos en factores y que, en definitiva, deben reunir las zonas de mayor aptitud para el aprovechamiento de la biomasa forestal. En el apartado 6.1.1. *Factores para la estimación de zonas aptas para el aprovechamiento de la Biomasa Forestal*, se hace una explicación de porqué se introduce cada factor y cuál es la manera de generarlo.

2. Normalización de los factores

La normalización es la estandarización de los factores en una misma escala para hacerlos comparables, debido a que el rango de valor entre los factores suele ser diferente. Esta normalización se puede llevar a cabo a través de distintas funciones de transformación. La que se utiliza en este estudio es la transformación lineal que se realiza según la siguiente ecuación.

$$f_i = (v_i - v_{\max}) / (v_{\max} - v_{\min}) * c$$

f_i = valor del factor normalizado

v_i = valor origen del factor (distintos valores que presenta el *raster* en los diferentes píxeles)

v_{\max} = valor máximo del *raster* a normalizar

v_{\min} = valor mínimo del *raster* que vamos a normalizar

c = rango de estandarización (si introducimos el valor $c=255$, el *raster* normalizado saldrá con un valor máximo de 255 y un valor mínimo de 0)

Dicha ecuación se implementa fácilmente con la herramienta *Calculadora Raster*.

3. Asignación de pesos a cada factor

En este punto se establecen las ponderaciones de los factores, de forma que pesen más en el modelo aquéllos que se considera que tienen una mayor importancia. La cuantificación de los factores se ha realizado en base a criterios técnicos como la cantidad de recurso disponible o la facilidad de extracción del recurso. En el apartado 6.1.2. *Asignación de Pesos a cada Factor* se explica que peso se le da a cada factor y porque.

4. Método de Suma Lineal Ponderada

Una vez realizados los apartados anteriores, tenemos todas las condiciones para realizar un Análisis Multicriterio. En este trabajo se ha utilizado la Suma Lineal Ponderada (SLP), en la cual se multiplica cada factor ya normalizado por su correspondiente peso, y posteriormente se suman los resultados.

5. Obtención de Restricciones

Las restricciones son criterios que limitan la posibilidad de considerar alguna opción, excluyéndola de forma definitiva. Estas son siempre capas booleanas. Las restricciones se generan mediante mapas binarios de unos (no hay restricción) y ceros o *NoData* (sí hay restricción), uno por cada restricción, éstos se multiplican entre sí, definiendo así las áreas de exclusión. Las restricciones se efectúan con la herramienta *Calculadora Raster* o con *Reclasificar* y suelen afectar a los factores establecidos, restringiendo su valor y extensión por motivos técnicos o medioambientales. En esta metodología se han establecido restricciones para:

- La estimación de las zonas con mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso.
- La selección de los emplazamientos para las instalaciones.

6. Obtención de zonas aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal (DEMANDA)

En este paso se obtiene un *raster* con valores de aptitud que podrían oscilar de 255 (mayor aptitud) a 0. Para ello el resultado de la SLP será multiplicado por el producto de la intersección de las restricciones, obteniendo el *raster* con valores de aptitud y con las aéreas excluidas del análisis.

Este raster obtenido se transforma en una capa vectorial de puntos (*De Raster a Punto*) que denominamos Puntos de Demanda, manteniendo los valores de aptitud para poder integrarlo posteriormente en un análisis de redes.

7. Obtención de emplazamientos óptimos para las instalaciones de Biomasa Forestal (OFERTA)

Como se ha mencionado anteriormente en el apartado de *Obtención de Restricciones*, la selección de emplazamientos idóneos para la localización de centrales de Biomasa se realiza mediante intersección booleana. En este análisis se establece una condición para cada una de las capas de información que posteriormente se superponen para comprobar dónde se cumplen todas las condiciones. Las restricciones se generan mediante mapas binarios de unos (no hay restricción) y ceros o *NoData* (sí hay restricción). Una vez que todos los mapas están en formato binario de unos y ceros, se procede a multiplicarlos entre sí (*Calculadora Raster*), eliminando las zonas excluidas, y en definitiva, obteniendo las zonas idóneas para el emplazamiento.

Este *raster* obtenido se transforma en una capa vectorial de puntos (*De raster a Punto*) que denominamos Puntos de Oferta, y que integraremos posteriormente en un análisis de redes.

8. Obtención de soluciones mediante modelos de Localización–Asignación (Análisis de Redes)

Los modelos de Localización-Asignación intentan evaluar las localizaciones de instalaciones deseables o no deseables en base a la distribución de la demanda y generar alternativas para lograr una distribución espacial más eficiente y/o equitativa. Buscan las ubicaciones óptimas (localización) y determinan las mejores vinculaciones de la demanda (asignación).

El objetivo de la localización-asignación, en este caso, es buscar instalaciones de modo que su suministro desde los puntos de demanda sea lo más eficiente posible.

Los elementos del modelo de localización-asignación son los siguientes:

- Puntos de demanda (ponderados): Zonas aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal
- Puntos de oferta: Emplazamientos óptimos para las instalaciones de Biomasa Forestal
- Cálculo de distancias: A través de la red de transporte

El análisis de localización-asignación en ArcGIS ofrece seis tipos de problemas diferentes para responder a preguntas de tipo específico: Minimizar la impedancia, Maximizar la cobertura, Minimizar las instalaciones, Maximizar la asistencia, Maximizar la cuota de mercado y Cuota de mercado objetivo. Para este estudio nos interesa aprovechar al máximo la localización de las instalaciones, es decir, que abarquen la mayor demanda posible de Biomasa Forestal, por este motivo se ha seleccionado el análisis de **Maximizar Cobertura**.

5.2. METODOLOGÍA PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE MINIHIDRAÚLICA

La localización de enclaves idóneos para la instalación de la Tecnología Minihidráulica está asociada espacialmente al recurso (caudal), además de depender de otros factores técnicos (desnivel, proximidad a red eléctrica, etc.) y ambientales (espacios protegidos). Para lograr este objetivo se ha originado una metodología de Análisis Multicriterio mediante operaciones de análisis con formatos *raster* (Tamaño de celda/píxel 25 x 25 m.) que se describe en el siguiente esquema:



Como se puede observar en el esquema anterior la metodología presenta los mismos pasos del multicriterio aplicado para la obtención de las zonas aptas para el aprovechamiento de la biomasa forestal, por lo que la explicación de los mismos se ha realizado de forma sucinta:

1. Obtención de factores

Los “factores” son aspectos que aumentan o disminuyen la valoración de una alternativa como solución al problema, pueden ser cuantitativos u cualitativos. Un factor determinante de esta energía renovable junto con el desnivel del terreno, son las masas de agua (caudales). La información sobre esta variable suele ser escasa en muchas zonas, puesto que tiene que existir una red densa de estaciones de medida de aforos para obtener datos de caudal. Por este motivo, en este trabajo se

presentan para la misma metodología dos modelos cuya diferencia sustancial se basa en los datos de inicio y herramientas aplicadas para estimar este factor:

- Modelo generado a partir de datos de caudal obtenidos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil.
- Modelo generado a partir de datos pluviométricos obtenidos de estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y del modelo digital del terreno de la zona de estudio, aplicando herramientas de hidrología del software ArcGIS.

En los apartados 6.2.1. y 6.2.2. se hace una explicación de porqué se introduce cada factor y cuál es la manera de generarlo.

2. Normalización de los factores

Estandarización mediante la función de transformación lineal implementada fácilmente con la Calculadora *Raster*:

$$f_i = (v_i - v_{\min}) / (v_{\max} - v_{\min}) * c$$

3. Asignación de pesos a cada factor

En el apartado de 6.2.3. *Asignación de Pesos a cada Factor* se explica que peso se le da a cada factor y porque.

4. Método de Suma Lineal Ponderada

En este paso se multiplica cada factor ya normalizado por su correspondiente peso, y posteriormente se suman los resultados.

5. Obtención de Restricciones

Las restricciones son criterios que limitan la posibilidad de considerar alguna opción, excluyéndola de forma definitiva. En el apartado de 6.2.5. *Restricciones de emplazamientos para las Centrales de Minihidráulica* se hace una explicación de porqué se introduce cada restricción.

6. Obtención de Enclaves Idóneos para la instalación de Centrales de Minihidráulica

En este paso se obtiene un raster con valores de aptitud que podrían oscilar de 255 (mayor aptitud) a 0. Para ello el resultado de la SLP se multiplica (Calculadora *Raster*) por el producto de la intersección de las restricciones, obteniendo el *raster* con valores de aptitud y con las aéreas excluidas del análisis.

6. PROCESOS Y RESULTADOS

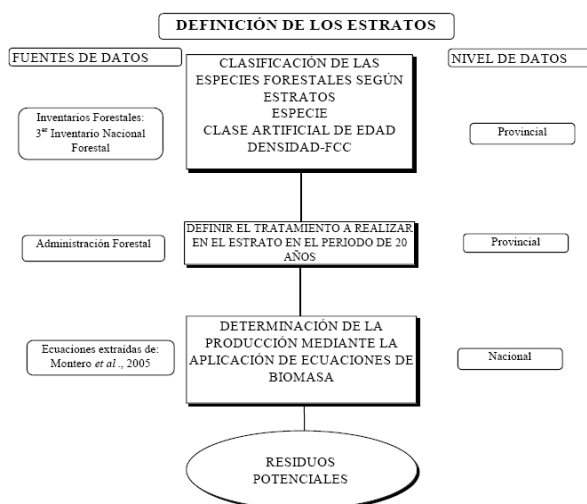
6.1. PROCESOS Y RESULTADOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE BIOMASA

6.1.1 Factores para la estimación de zonas aptas para el aprovechamiento de la Biomasa Forestal

Mediante la consulta de distintas fuentes del campo de la Biomasa Forestal, se han propuesto una serie de condiciones que transformaremos en factores y que, en definitiva, deben reunir las zonas de mayor aptitud para el aprovechamiento de la biomasa forestal.

Factor de Biomasa Disponible

Para la obtención de este factor se ha extraído información del **Plan de Aprovechamiento Energético de la Biomasa en las comarcas de El Bierzo y Laciana (León) elaborado por el CEDER**. Este Plan desarrolla un método para cuantificar la Biomasa Forestal aplicando bases de datos nacionales actualizadas como el Inventario Forestal Nacional (IFN3) y el Mapa Forestal Español (MFE). La biomasa forestal arbolada se cuantifica a partir de los trabajos de Montero et al., (2005) “Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles” y “Evaluación de los recursos de biomasa forestal en la provincia de Soria. Análisis de alternativas para su aprovechamiento energético” de Esteban et al., (2004).



Esquema de trabajo. Fuente: Plan de Aprovechamiento Energético de la Biomasa en las comarcas de El Bierzo y Laciana

El IFN3 y el MFE, proporcionan datos cuantitativos provinciales sobre las superficies arboladas describiendo las mismas por estratos. Los estratos se definen y clasifican según la especie o especies presentes.

Tabla 1. Estratos del IFN y Cabida para la comarca de El Bierzo

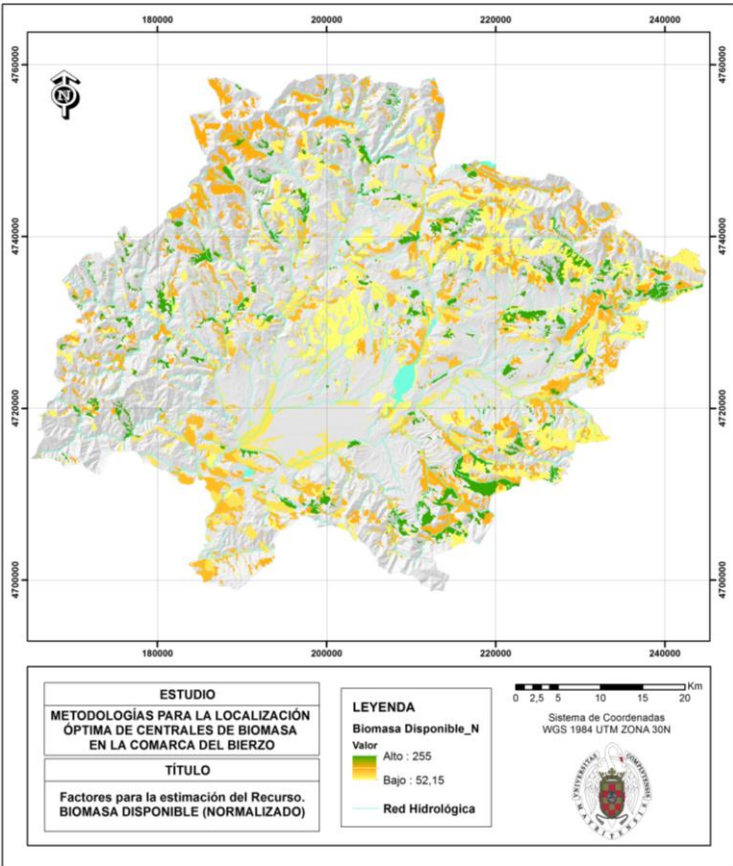
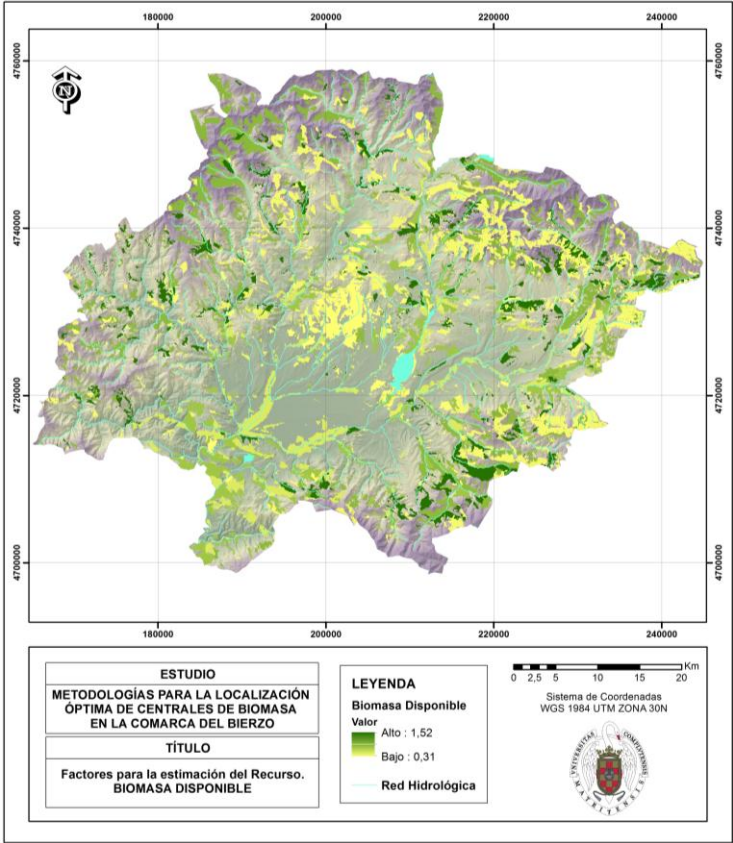
ESTRATO	FORMACIÓN FORESTAL DOMINANTE	ESPECIE DOMINANTE	FRACCIÓN CABIDA CUBIERTA (%)
1	<i>Quercus pyrenaica</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>	≥ 70
2	<i>Quercus pyrenaica</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>	40 - 69
3	<i>Quercus pyrenaica</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>	20 - 39
7	<i>Quercus pyrenaica</i> , <i>Quercus ilex</i> y 70% de cobertura de matorral	<i>Quercus pyrenaica</i>	≥ 5
8	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	≥ 70
9	<i>Pinus sylvestris</i> con <i>Pinus nigra</i> o con <i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	≥ 70
11	<i>Pinus sylvestris</i> con <i>Pinus sylvestris</i> con <i>Quercus pyrenaica</i> y 70% de cobertura de matorral	<i>Pinus sylvestris</i>	40 - 69 ó ≥ 60
12	<i>Quercus ilex</i> y <i>Quercus ilex</i> con <i>Quercus pyrenaica</i>	<i>Quercus ilex</i>	≥ 20
13	<i>Quercus ilex</i>	<i>Quercus ilex</i>	≥ 5
15	<i>Pinus pinaster</i> y 70% de cobertura de matorral	<i>Pinus pinaster</i>	≥ 20
16	<i>Pinus radiata</i>	<i>Pinus radiata</i>	≥ 70
18	<i>Pinus nigra</i>	<i>Pinus nigra</i>	≥ 20
20	<i>Quercus pyrenaica</i> y <i>Betula ssp</i>	<i>Quercus pyrenaica</i>	≥ 40
21	<i>Populus x Canadensis</i>	<i>Populus x Canadensis</i>	≥ 5

Una vez clasificadas las masas forestales por estratos, se identifican los tratamientos adecuados que pueden ser realizados en cada estrato en un horizonte de 20 años. A partir de las labores silvícolas a realizar se estiman las cantidades de residuos que podrían obtenerse en cada estrato.

Tabla 2. Superficies (ha) y Biomasa Forestal (t ms/ha año) para la comarca de El Bierzo

ESTRATO	ESPECIE DOMINANTE	BIOMASA POTENCIAL (t ms/ha)	SUPERFICIE BIOMASA DISPONIBLE (ha)	PESO BIOMASA DISPONIBLE (t ms/año)	RECURSO DE BIOMASA DISPONIBLE (t ms/ha año)
1	<i>Quercus pyrenaica</i>	45,91	11.544	17.646	1,53
2	<i>Quercus pyrenaica</i>	25,94	13.366	11.693	0,87
3	<i>Quercus pyrenaica</i>	8,63	2.671	835	0,31
7	<i>Quercus pyrenaica</i>	10,36	2.601	969	0,37
8	<i>Pinus sylvestris</i>	10,23	1.759	661	0,38
9	<i>Pinus sylvestris</i>	12,01	692	300	0,43
11	<i>Pinus sylvestris</i>	9,92	8.466	3.017	0,36
12	<i>Quercus ilex</i>	21,75	8.442	6.489	0,77
13	<i>Quercus ilex</i>	13,54	4.251	2.028	0,48
15	<i>Pinus pinaster</i>	10,69	1.041	415	0,40
16	<i>Pinus radiata</i>	7,96	3.102	988	0,32
18	<i>Pinus nigra</i>	9,67	782	279	0,36
20	<i>Quercus pyrenaica</i>	28,48	8.701	7.711	0,89
21	<i>Populus x Canadensis</i>	11,87	4.308	1.993	0,46

En la siguiente figura se muestra el *raster* del recurso de Biomasa Disponible (t ms/ha año) con los valores que se muestran en la tabla 2. Este se ha obtenido a partir del *shape* del Mapa Forestal de España, actualizado con la base de datos del IFN3 y con la estimación de residuos por estratos, convirtiéndolo posteriormente a formato raster (*Polígono a Raster /Polygon to Raster*) con un tamaño de celda de 100 x 100 m). Finalmente, se obtiene el *raster* normalizado mediante la ecuación lineal que se describe en la metodología, implementada en ArcGIS (*Calculadora Raster /Raster Calculator*):



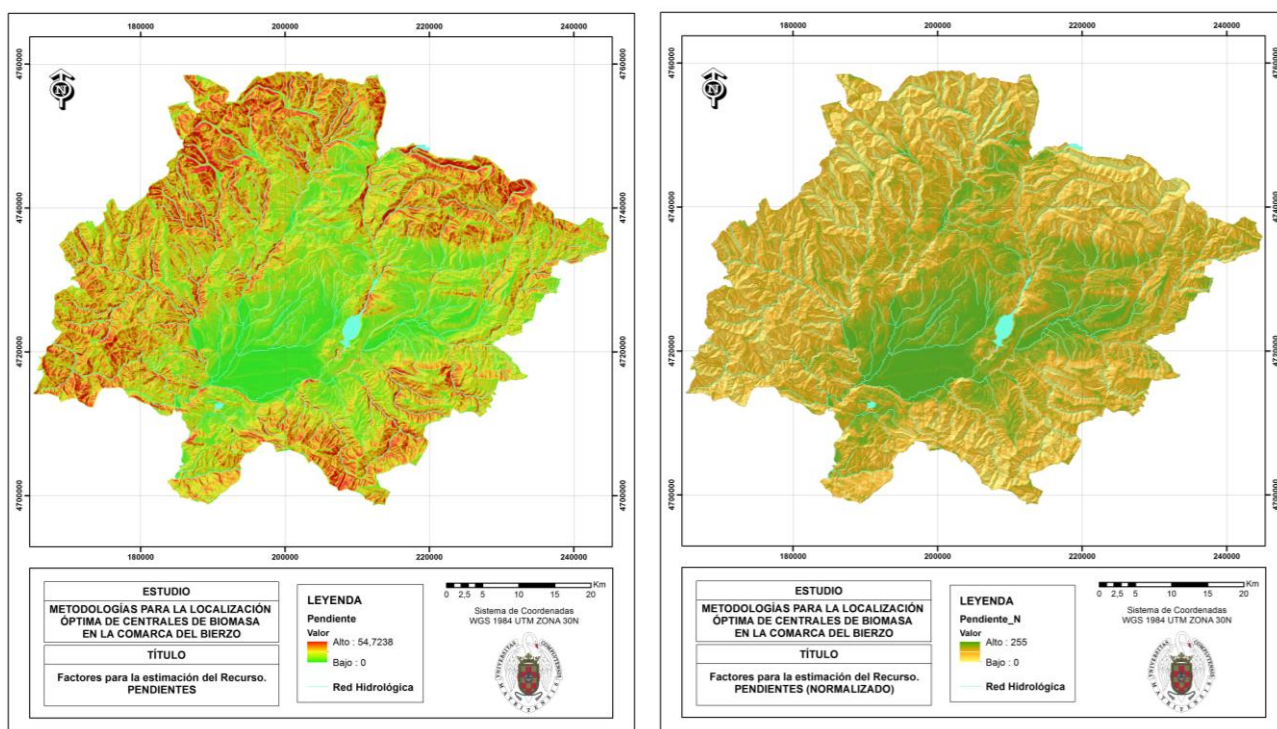
Factor Pendientes

Este factor es importante para la extracción del recurso disponible de las parcelas forestales, puesto que conlleva la utilización de maquinaria incrementando el coste de extracción. La maquinaria utilizada en estos trabajos forestales trabaja hasta determinados valores máximos de pendiente, de manera que el terreno susceptible de ser utilizado para el acopio de biomasa se clasifica en función de este elemento. Para establecer los valores del factor pendientes se han tenido en cuenta los intervalos de pendiente del terreno-eficiencia de extracción de recursos estimados por Garañeda y Bengoa (2005) para Castilla y León.

Tabla 3. Relación Pendientes (%) y Eficiencia de Extracción de Biomasa (%)

PENDIENTES (%)	EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN (%)
<10%	80%
10 - 30%	70%
30 -50%	20%
>50%	Nula

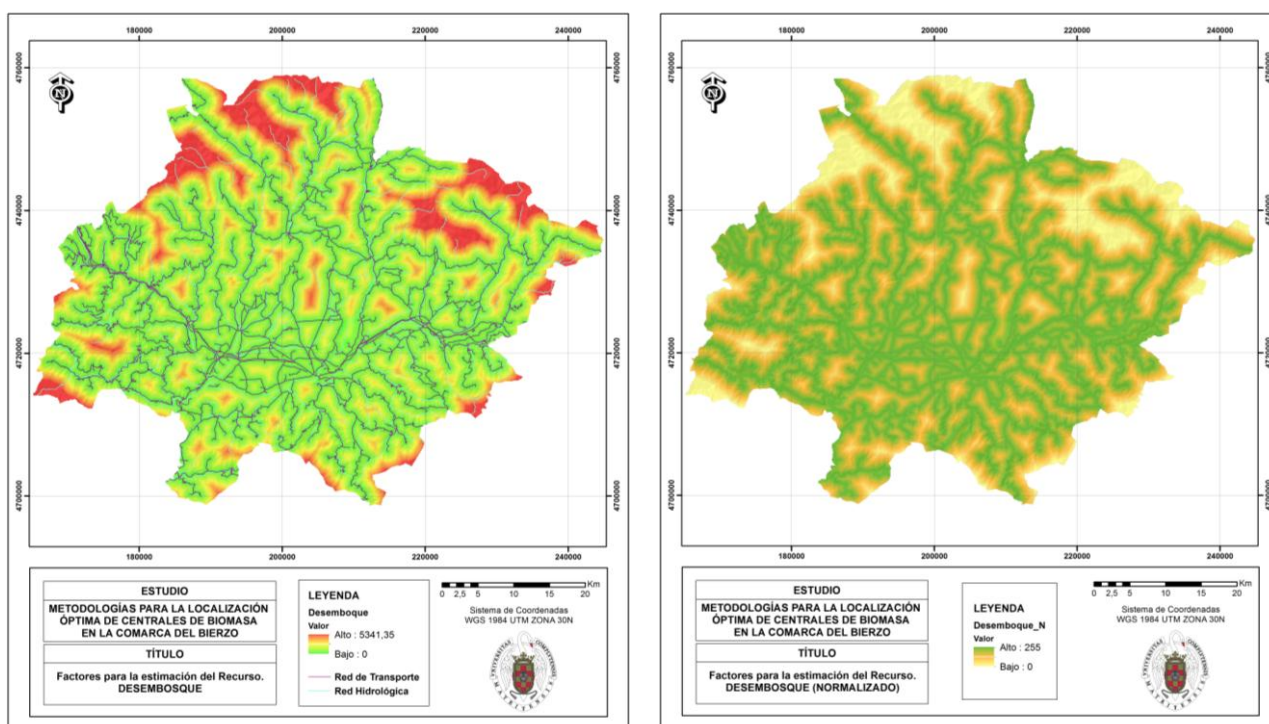
Las pendientes se han obtenido a partir de un MDT de la zona del Bierzo, formado por un mosaico de varios MDTs (tamaño celda de 25x25 m.), que se ha remuestreado (*Remuestrear/Resampling*) para tener un paso de malla de 100 x 100 m. Este *raster* se ha utilizado, finalmente, para obtener las pendientes mediante la herramienta “*Pendiente/Slope*”. A continuación se muestran el *raster* de pendientes de El Bierzo y el *raster* normalizado, en el que se utiliza una gama de colores que van desde el verde (valores más altos) a una amarillo claro (valores bajos).



Factor de Distancia a vías de comunicación (Desembosque)

El coste de extracción de la biomasa depende de la pendiente del terreno, así como de la distancia de las masas forestales donde se ejecutan los trabajos de extracción hasta las vías de comunicación (carreteras, caminos o pistas) donde habitualmente se sitúan las zonas de acopio de la biomasa forestal residual.

Este factor se obtiene mediante la herramienta “*Distancia Euclideana/Euclidean Distance*” sobre cobertura a caminos, carreteras y autopistas. Como este factor depende de la distancia, se le ha realizado el ajuste opuesto para que las localizaciones más próximas a las vías de comunicación tomen valores más elevados.



6.1.2. Asignación de Pesos a cada Factor

Una vez obtenidos los factores normalizados, se les asigna un peso en función de la importancia del recurso y la dificultad de extracción, para así obtener un *raster* ponderado con las zonas de aprovechamiento de Biomasa:

Tabla 4. Pesos asignados a cada factor

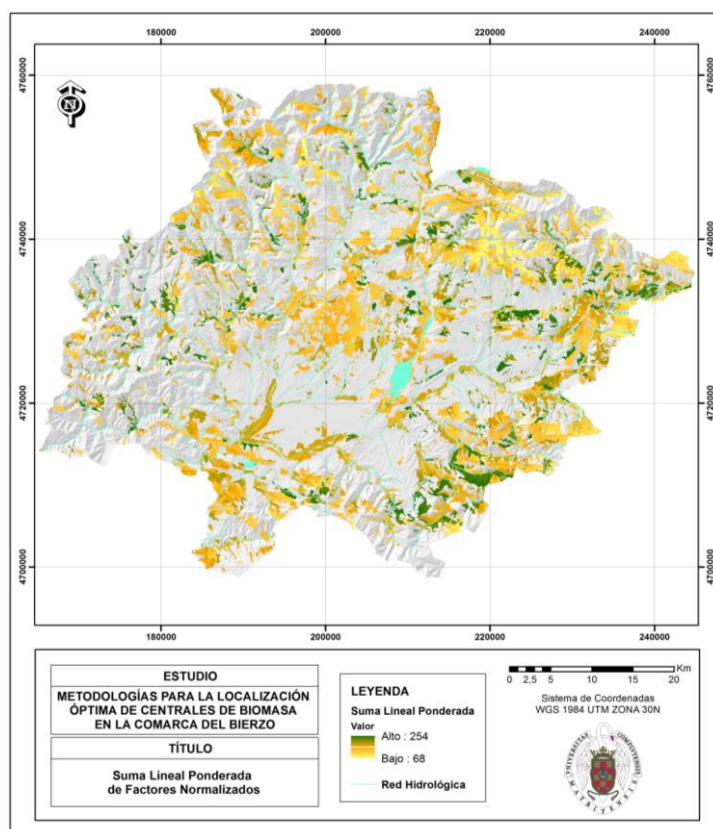
FACTORES	INDICADOR	PESO
Biomasa Forestal	Cantidad de Residuo	0,45
Pendiente	Desnivel en porcentaje	0,30
Desembosque	Distancia a Red Viaria	0,25

El mayor peso, se le asigna a la Biomasa Disponible, dado que esta tecnología se fundamenta en el aprovechamiento de este recurso natural para obtener energía. Se ha fijado un peso medio a la pendiente puesto que condiciona de forma sustancial la extracción de biomasa al impedir el uso de determinada maquinaria, encareciendo demasiado su extracción, y comprometiendo la sostenibilidad ambiental del aprovechamiento. Finalmente, se le ha dado un peso algo menor al factor de desembosque, ya que la infraestructura viaria en este caso (El Bierzo) es bastante densa, por lo que su influencia en este análisis es menos significativa.

6.1.3. Suma Lineal Ponderada

El resultado que se obtiene en este método de análisis multicriterio es un sumatorio de los factores normalizados multiplicados por su correspondiente peso. El producto gráfico final es un *raster* ponderado con las zonas de aprovechamiento de Biomasa Forestal, que permite conocer aquellas zonas más adecuadas, así como las menos idóneas para el aprovechamiento de este recurso energético.

Esta operación se realiza mediante una herramienta de *Spatial analyst* denominada Suma Ponderada (*Weight Sum*).



6.1.4. Restricciones de áreas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal

Las capas de restricciones se han obtenido mediante consultas con la herramienta “*Calculadora Raster /Raster Calculator*”. Después, dichas capas se han reclasificado (*Reclasificar/Reclasify*) de manera que se ha dado el valor 1 a las zonas no restringidas y el valor *NoData* al resto.

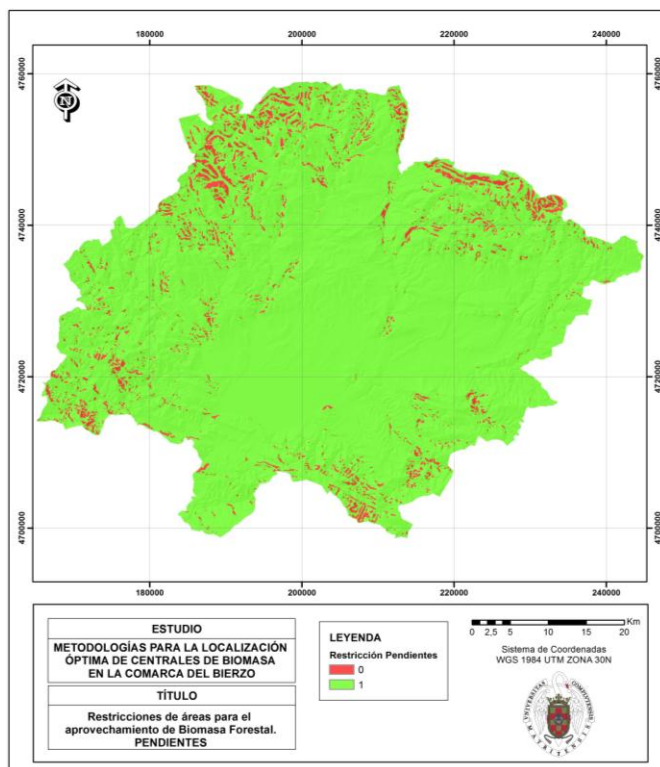
Restricción Pendientes

Como se ha explicado anteriormente la pendiente condiciona de forma sustancial la extracción de biomasa al impedir el uso de determinada maquinaria. La pendiente superior al 50% es el umbral de restricción de este factor, puesto que por encima de este desnivel el aprovechamiento de este recurso deja de ser rentable, y se clasifica como nula en la clasificación estimada por Garañeda y Bengoa (2005) para Castilla y León.

PENDIENTES (%)	EFICIENCIA DE EXTRACCIÓN (%)
<10%	80%
10 - 30%	70%
30 -50%	20%
>50%	Nula

Por otro lado, desde el punto de vista ambiental, la permanencia en el monte tras el aprovechamiento de las fracciones más finas de biomasa como los ramillos finos y follaje, además de los sistemas radicales, ayudan a la disminución del riesgo de erosión mediante la captación y almacenamiento de agua y la reducción de la escorrentía. Además, también se verá reducida la compactación que realiza la maquinaria forestal en las labores de aprovechamiento en el monte. Debido al gran problema que es la erosión para la fertilidad del suelo en las masas forestales, algunos autores (EEA, 2006; López-Rodríguez *et al.*, 2009) estiman que pendientes mayores del 20% no presentan buena idoneidad para la extracción de biomasa.

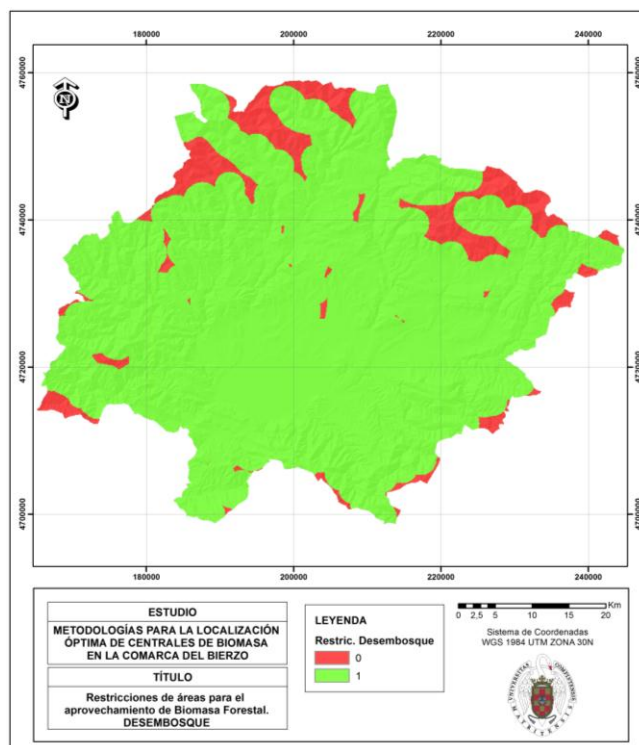
En este trabajo se propone una pendiente del 30% como valor límite de extracción, que permite mantener un riesgo bajo de erosión en las zonas de fuertes pendientes, así como obtener una buena eficiencia de extracción, ya que este parámetro se reduce en gran proporción a partir de este valor de pendiente.



Restricción de desembosque

Como se ha mencionado anteriormente, la distancia entre las zonas de cortas y clareos de biomasa forestal y la red viaria es un factor importante en la selección de zonas aptas para el aprovechamiento de este recurso. Este factor presenta un umbral de rentabilidad mínima, que atendiendo a datos de relación productividad-distancia de desembosque obtenidos del trabajo de García-Martín et al. (2011) se sitúa en torno a 2.000-3.000 metros de distancia, a partir de los cuales el beneficio es muy bajo o nulo.

En este trabajo se propone una distancia de desembosque de 2.000 m. (*Calculadora Raster /Raster Calculator*) como valor límite para la selección de zonas aptas para el aprovechamiento de la biomasa forestal.

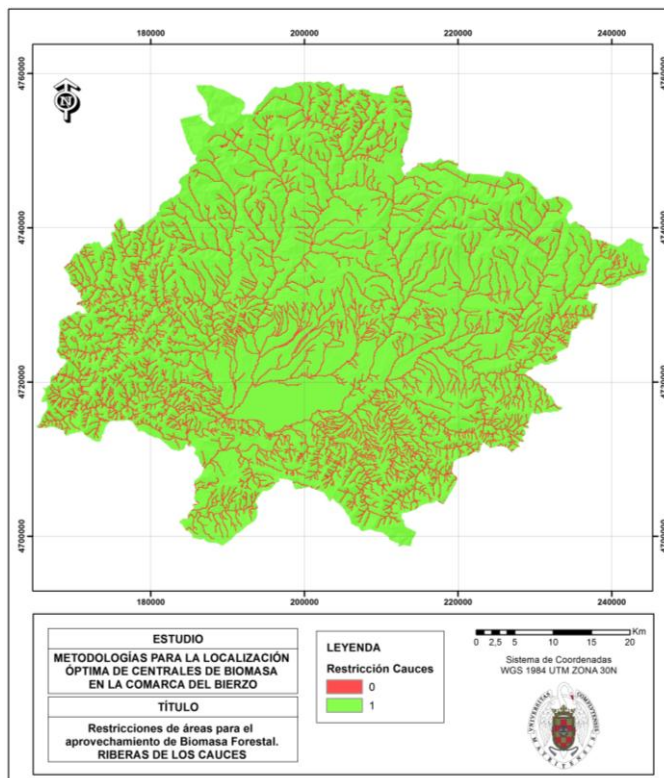


Restricción para la extracción de biomasa próxima a los cauces (Vegetación de Ribera)

El aprovechamiento de la biomasa forestal de zonas riparias como recurso energético puede conllevar inconvenientes ambientales, puesto que los bosques de ribera constituyen un verdadero ecosistema diferenciado de los entornos que atraviesa, lo cual los convierte en corredores ecológicos, esto es, rutas de migración y dispersión para animales y vegetales. Además, la presencia de vegetación en las riberas contribuye a estabilizar la geometría del cauce, protegiéndolo de la erosión, dando mayor cohesión al suelo a través de sus raíces, y disminuyendo el arrastre de sedimentos. Cuando las orillas soportan vegetación leñosa, la corriente erosiona más el lecho fluvial que los taludes laterales, dando lugar a tramos de cauces encajados y estables. La utilización de maquinaria para la extracción de biomasa en estos entornos fluviales puede suponer afecciones ambientales significativas (contaminación acústica y atmosférica, compactación y erosión de los suelos, etc.).

Uno de los aspectos importantes que condiciona el funcionamiento del ecosistema del río es la regulación de la luz que controla la vegetación de ribera sobre el cauce mediante el sombreado de árboles y arbustos, regulando la temperatura del ambiente y en especial la del agua, influyendo en aspectos tan importantes como el contenido de oxígeno en el agua, la disponibilidad de nutrientes, la composición y estructura de las poblaciones de peces y otros organismos acuáticos.

Estos factores hacen complicado decidir que parte de la biomasa de estos bosques riparios es la que se puede extraer para su aprovechamiento energético. Por este motivo se propone una banda de restricción de 100 m a ambos lados de los ejes de los cauces de la zona estudio que se corresponden con la Zona de Policía, los cuales no podrán ser utilizados para aprovechamiento de biomasa forestal. Esta restricción se ha obtenido mediante la herramienta “*Distancia Euclideana/Euclidean Distance*” a los cauces, realizando posteriormente una consulta con la herramienta “*Calculadora Raster /Raster Calculator*” para obtener finalmente la banda de exclusión de 100 m.

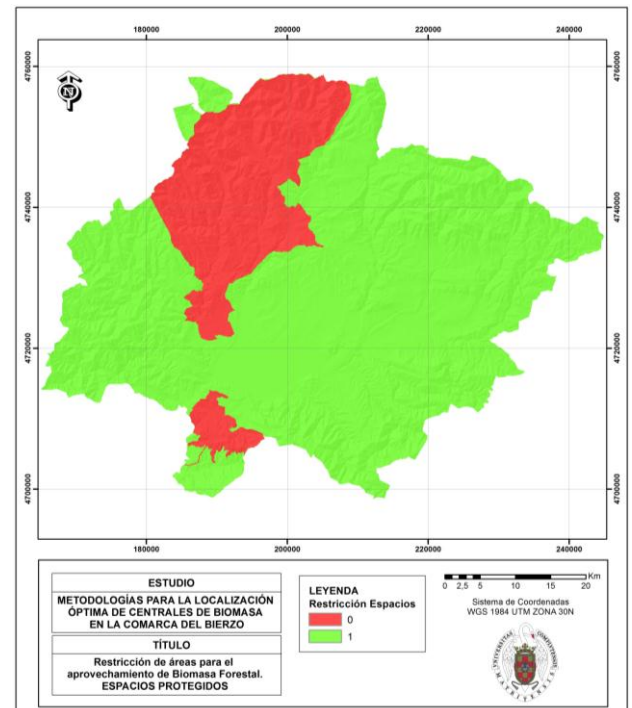
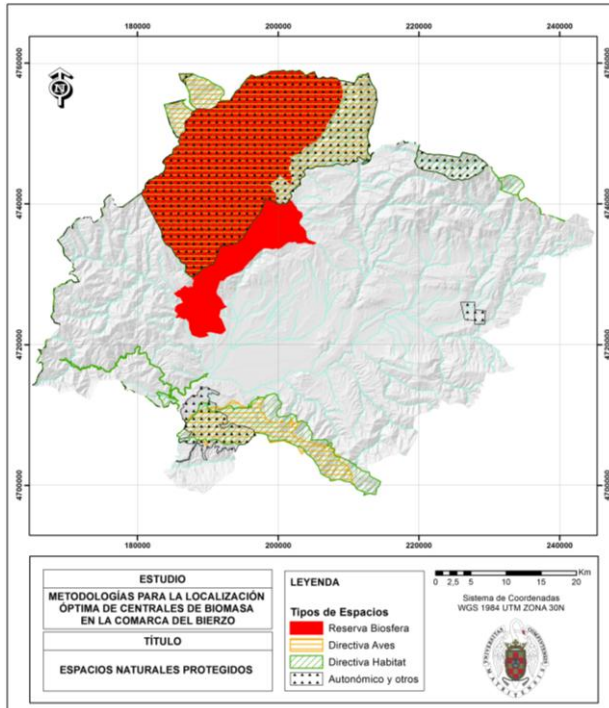


Restricción de Espacios Naturales Protegidos

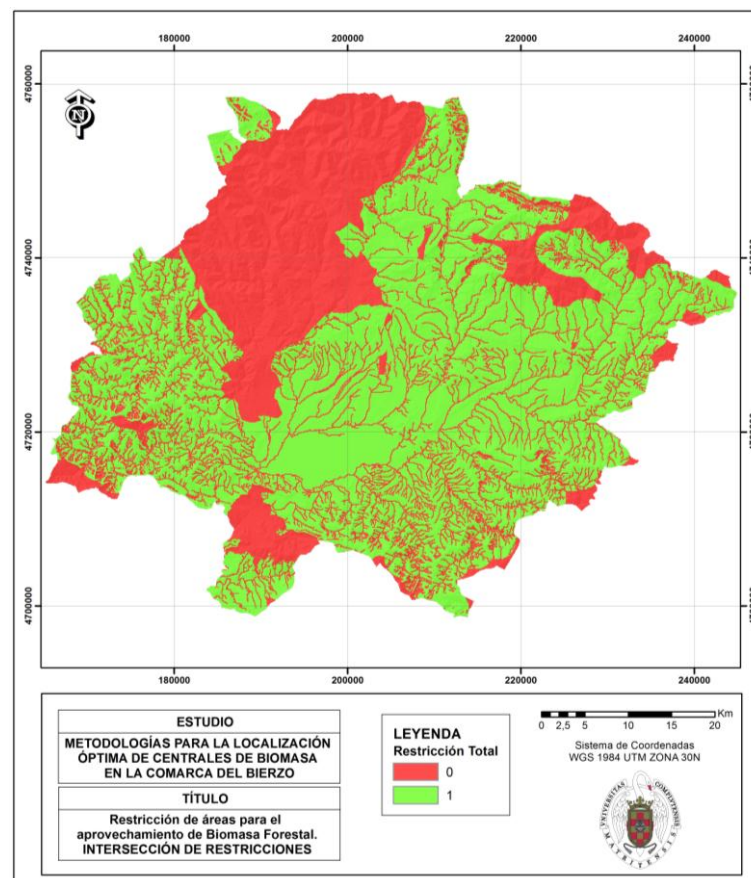
En el caso de la biomasa, muchas de las masas forestales aprovechables con este fin se localizan en espacios naturales protegidos. En este sentido debemos diferenciar distintas figuras, algunas más flexibles y otras por el contrario más prohibitivas que no permiten el desarrollo y explotación de los recursos naturales que conservan por ser zonas con ecosistemas, comunidades o elementos biológicos singulares por su rareza, importancia o fragilidad. Mientras que los Parques Naturales suelen permitir la coexistencia del hombre y sus actividades con la naturaleza mediante el uso equilibrado y sostenible de los recursos, en otras figuras de protección como las Reservas, la explotación de recursos está limitada y se prohíbe la recolección de material biológico o geológico.

Por este motivo se ha considerado como zonas restringidas para el aprovechamiento del recurso la Reserva de la Biosfera de los Ancares y otros espacios como el Parque Cultural de las Médulas que son Bien de Interés Cultural como Zona Arqueológica (1996), Monumento Natural (2002), además de estar incluida en la Lista del Patrimonio Mundial de la Unesco (1997).

Para obtener esta restricción, en primer lugar se ha convertido la capa vectorial de Espacios Naturales Protegidos a *raster* (*Polígono a Raster /Polygon to Raster*), y posteriormente se ha realizado una reclasificación de este *raster* (*Reclasificar/Reclassify*) asignando el valor 0 de exclusión a los espacios considerados restringidos para el aprovechamiento de la biomasa forestal.

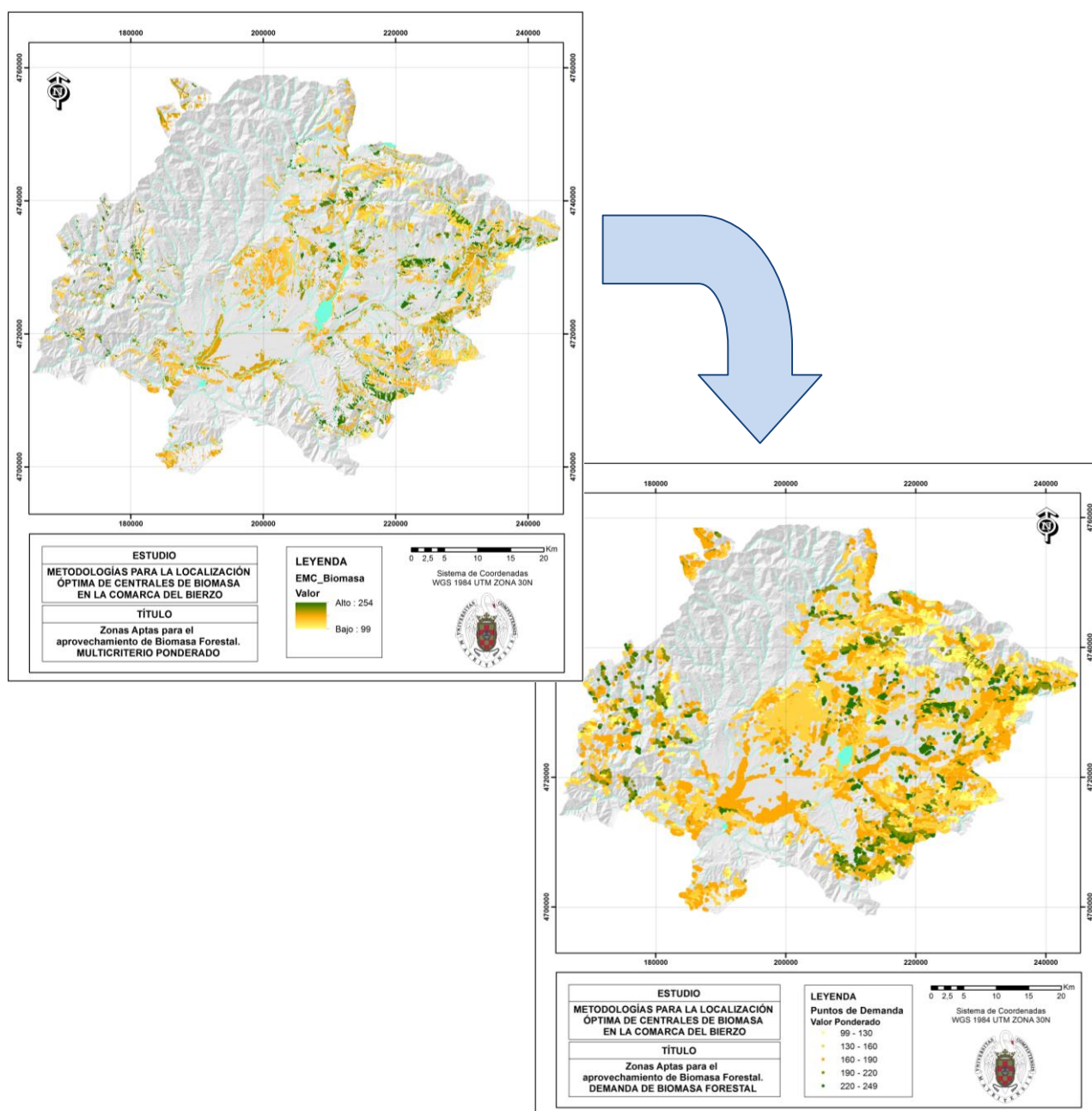


6.1.5. Intersección del conjunto de Restricciones para el aprovechamiento de Biomasa Forestal



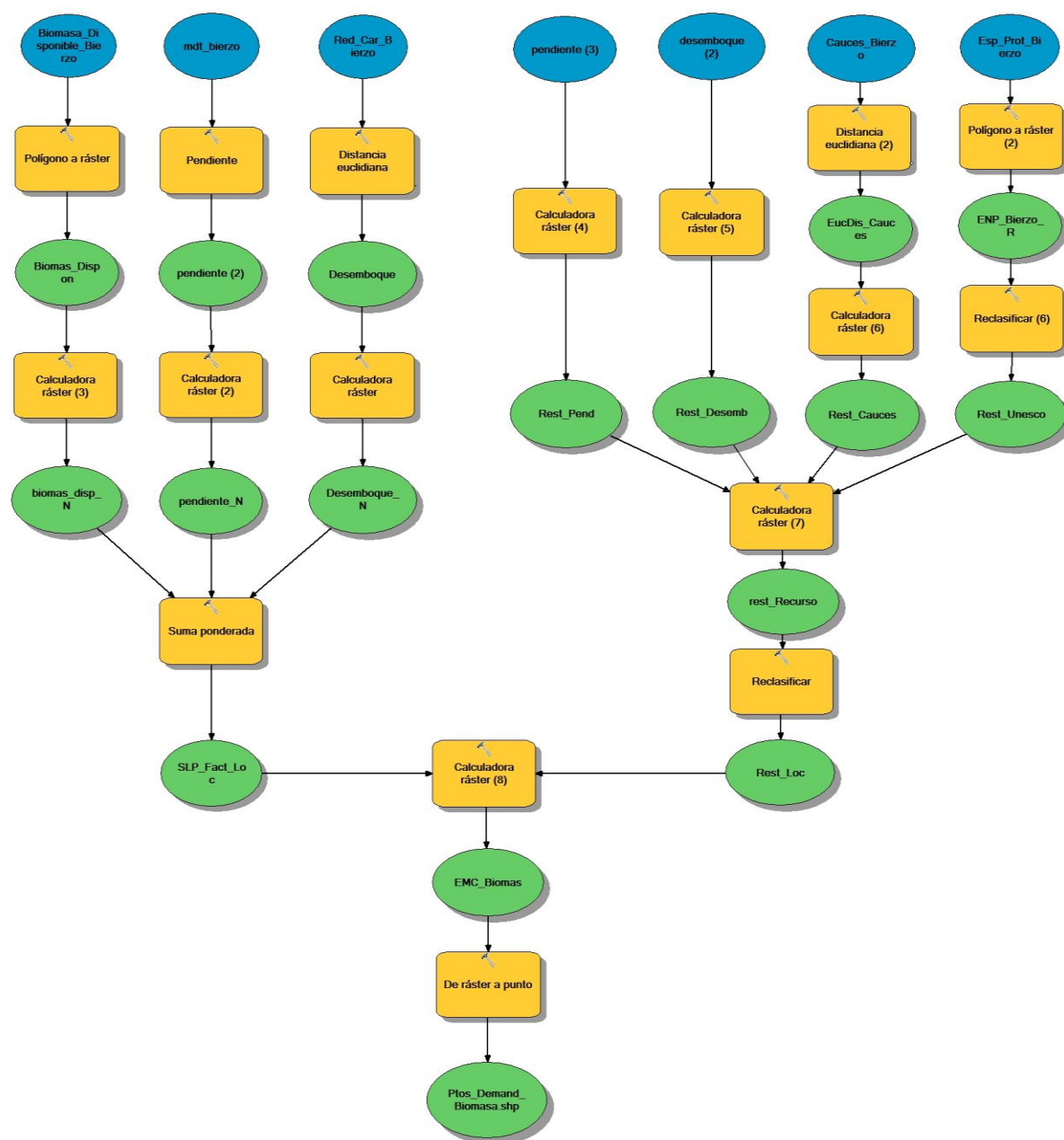
6.1.6. Resultado de las Zonas Aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal (DEMANDA)

A través de la herramienta “*Calculadora Raster/Raster Calculator*” se multiplica el resultado de la SLP por el producto de la intersección de las restricciones, obteniendo como resultado final del análisis Multicriterio Ponderado un *raster* compuesto de celdas de 100 x 100 m (una ha de superficie) con los valores de aptitud de Biomasa Forestal y con las aéreas excluidas del análisis. Este *raster* obtenido se transforma en una capa vectorial de puntos (*De Raster a Punto/Raster To Point*) que denominamos Puntos de Demanda de Biomasa Forestal, manteniendo los valores de aptitud para poder integrarlo posteriormente en un análisis de redes.



6.1.7. Resumen del Proceso Parcial para la obtención de las Zonas Aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal (DEMANDA)

Como se menciona al principio del trabajo, para la gestión, análisis y representación de las distintas bases de datos y capas de información gráfica se ha utilizado ArcGIS 10. Este software presenta una herramienta muy útil para este tipo de Metodologías denominada **Model Builder**, que permite crear nuevas herramientas y automatizar los flujos de trabajo. A continuación se muestra el esquema de procesos llevados a cabo en *Model Builder* para obtener las Zonas Aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal (DEMANDA):

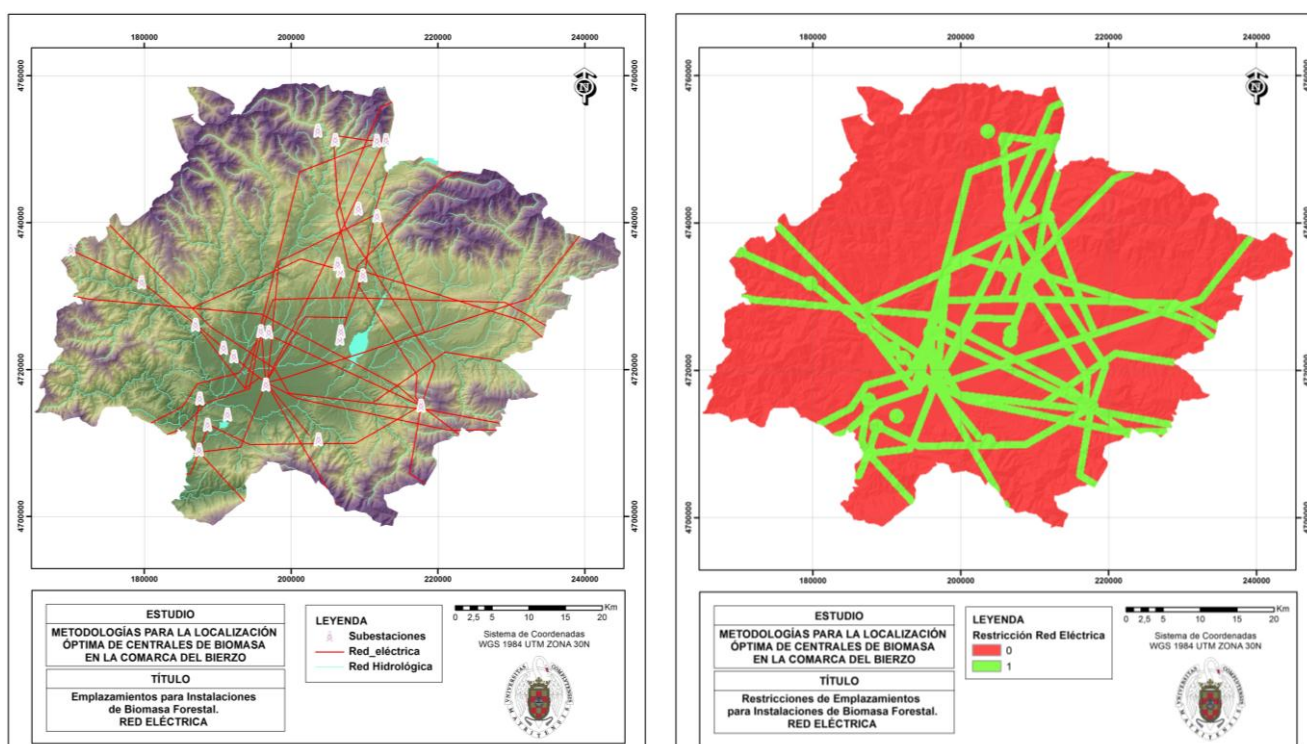


6.1.8. Restricciones de áreas para las instalaciones de Biomasa Forestal

Restricción de red eléctrica

Es interesante que la localización de la central de biomasa este próxima a la red eléctrica existente, puesto que una ubicación alejada de la infraestructura eléctrica conlleva un gasto adicional de conexión que puede hacer inviable el proyecto. Además, la realización de una nueva línea eléctrica implica impactos ambientales sobre los recursos naturales, sociales y culturales (desbroce de la vegetación, construcción de torres, etc.), siendo estas afecciones más significativas a mayor longitud de la línea.

Para esta restricción se ha partido de capas de la red eléctrica y subestaciones de la zona de estudio obteniendo áreas de influencia en función de criterios de eficiencia mediante la herramienta “Zona de Influencia/Buffer”. Se ha propuesto un radio de eficiencia de 1.000 m a subestaciones eléctricas, y en el caso de la red de alta tensión se ha penalizado con una distancia menor (500 m), debido a que este tipo de conexión necesita de una transformación previa (cambio de tensión), que comporta un mayor coste técnico y ambiental. Ambos *buffer*, se han unificado en un solo *shape* (*Fusionar/Merge*) que posteriormente se ha transformado a *raster* (*Poligono a Raster /Polygon to Raster*).

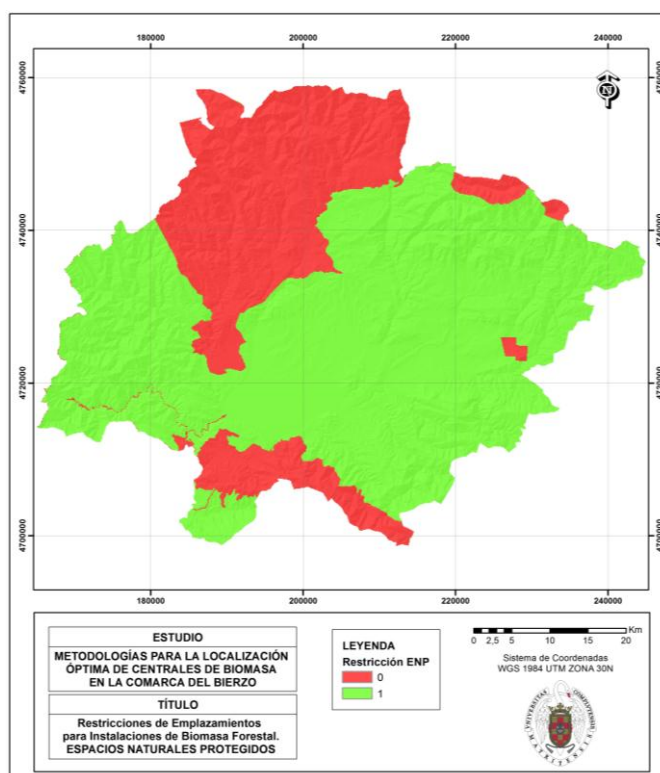


Restricción de Espacios Naturales Protegidos

Estas áreas responden a una estrategia de conservación, gracias a que reúnen una serie de valores cuya coincidencia en el espacio diferencia a estas áreas del resto del territorio. Por este motivo, el criterio adoptado a la hora de valorar la incidencia sobre cada uno de los espacios contemplados es, estrictamente, el de considerar el nivel de protección otorgado por la Administración oportuna. En la zona de estudio encontramos espacios protegidos por la legislación europea, como la Red Natura 2000 (Directiva Aves y Directiva Habitats), nacional (Reserva de la Biosfera) y autonómica o local.

En el caso de la selección de emplazamientos para la localización de una industria energética de este tipo, se ha optado por excluir aquellos espacios naturales que presentan protección por cualquier Administración competente.

Para obtener esta restricción en primer lugar se ha convertido la capa vectorial de Espacios Naturales Protegidos a raster (*Polígono a Raster /Polygon to Raster*), y posteriormente se ha realizado una reclasificación de este raster (*Reclasificar/Reclassify*) asignando el valor 0 de exclusión a todos los espacios protegidos.

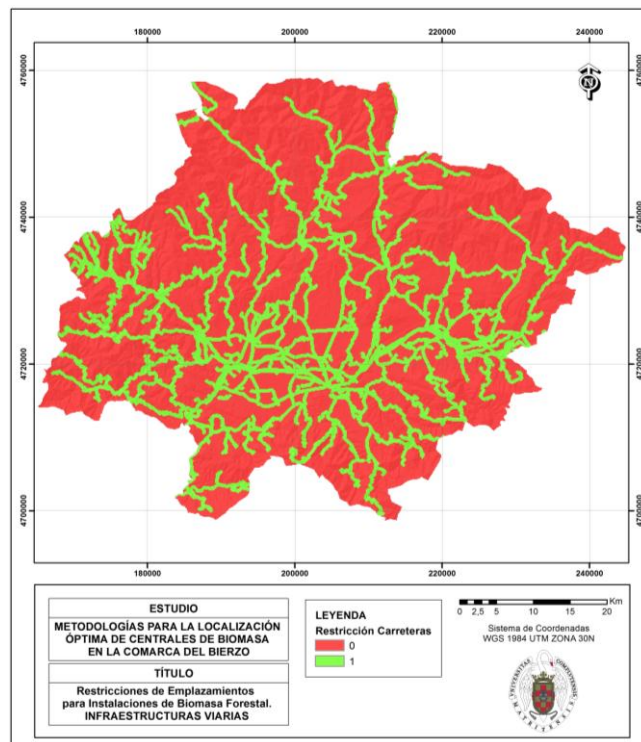


Restricción de Infraestructuras Viarias

Así como la distancia de las masas forestales (donde se ejecutan los trabajos de extracción), hasta los caminos o pistas (donde se sitúan las zonas de acopio del recurso) es fundamental, también la accesibilidad a las instalaciones es un dato de importancia para el suministro del recurso, así como para la construcción y posterior gestión y mantenimiento de la central de biomasa. En consecuencia se ha estimado que una distancia superior a 200 m a la red viaria conlleva mayor coste de construcción de infraestructuras y posibles afecciones ambientales que pueden hacer inviable el proyecto.

Esta restricción se obtiene mediante la herramienta “*Distancia Euclideana/Euclidean Distance*” sobre la cobertura de pistas, carreteras y autovías. Posteriormente se ha realizado una consulta con la

herramienta “*Calculadora Raster /Raster Calculator*” para obtener finalmente la franja de 200 m. próxima a la red viaria.



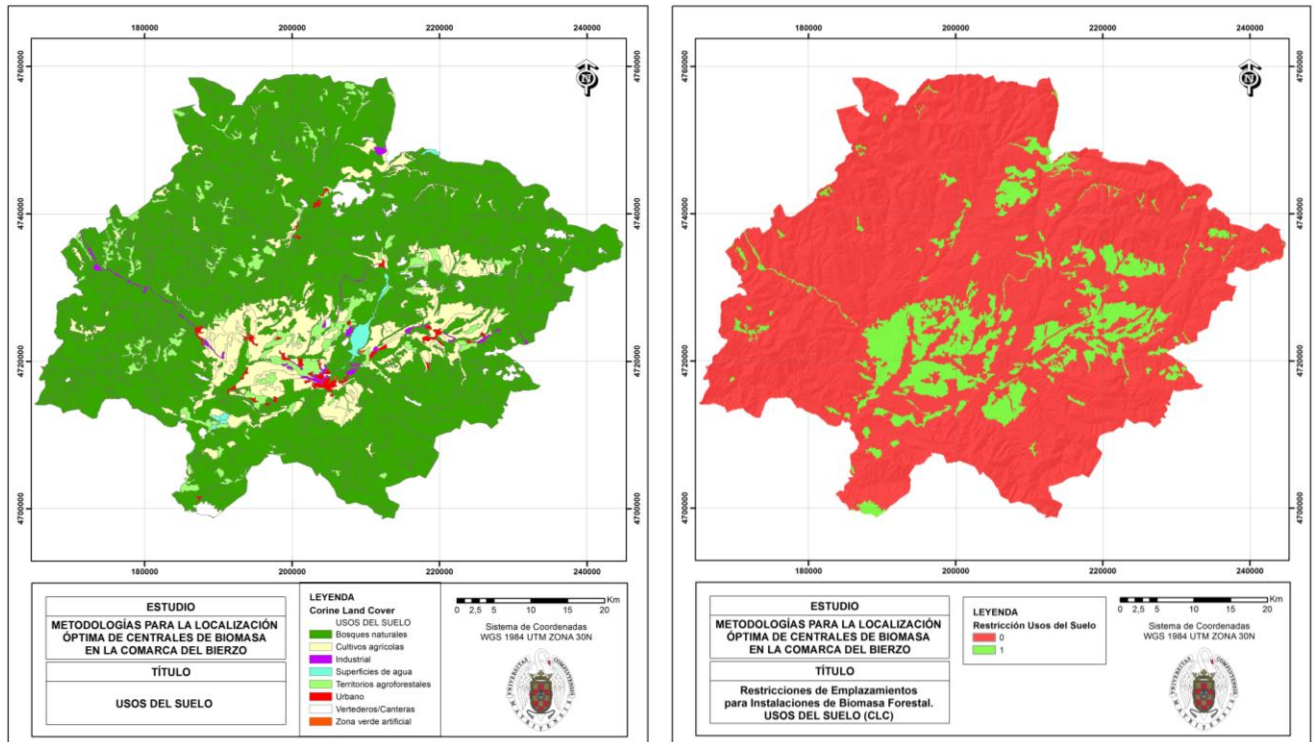
Restricción de Usos del Suelo

En la selección de una localización para una instalación de carácter industrial, se deben analizar los terrenos con mayor capacidad de acogida para este uso. En este sentido, se han propuesto una serie de usos del suelo con mayor capacidad de acoger la central de Biomasa, por tener una menor afección ambiental potencial sobre el medio. A continuación se muestra una tabla con clases de uso del suelo elaborada a partir del Corine Land Cover, en donde se especifica la clase y su propuesta como apto o restringido para albergar este tipo de instalaciones:

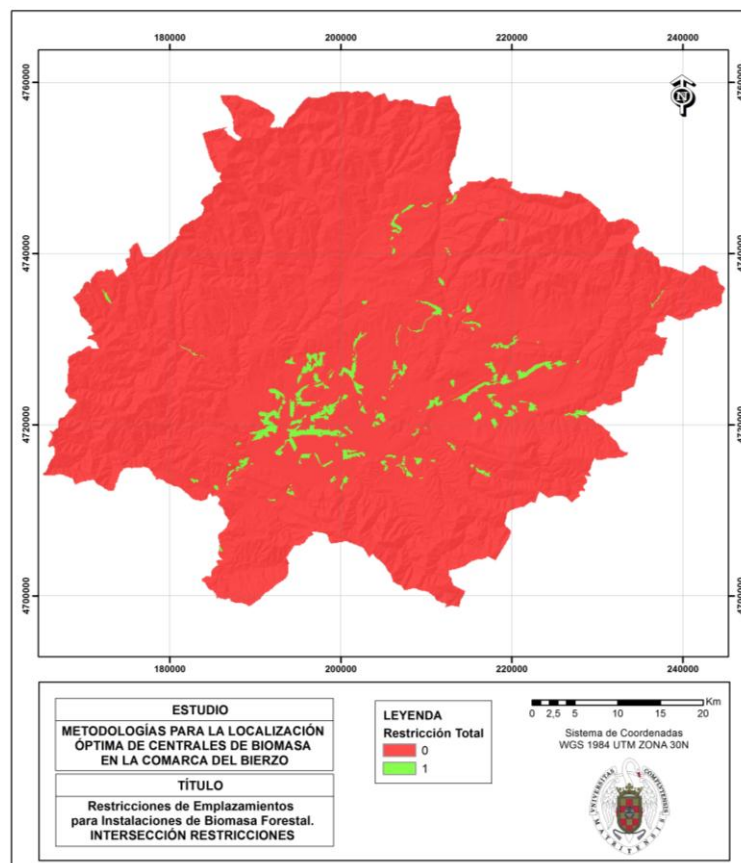
Tabla 5. Capacidad de acogida de los usos del suelo para las instalaciones

USO DEL SUELO	CAPACIDAD DE ACOGIDA
Urbano	Restringido
Industrial	Apto
Zona verde artificial	Restringido
Cultivos agrícolas	Apto
Territorios agroforestales	Restringido
Bosques naturales	Restringido
Vertederos/Canteras	Apto
Superficies de agua	Restringido

Para obtener esta restricción en primer lugar se ha convertido la capa vectorial del Corine a *raster* (*Polígono a Raster /Polygon to Raster*), y posteriormente se ha realizado una reclasificación de este raster (*Reclasificar/Reclassify*) asignando el valor 0 de exclusión a las zonas de menor acogida.

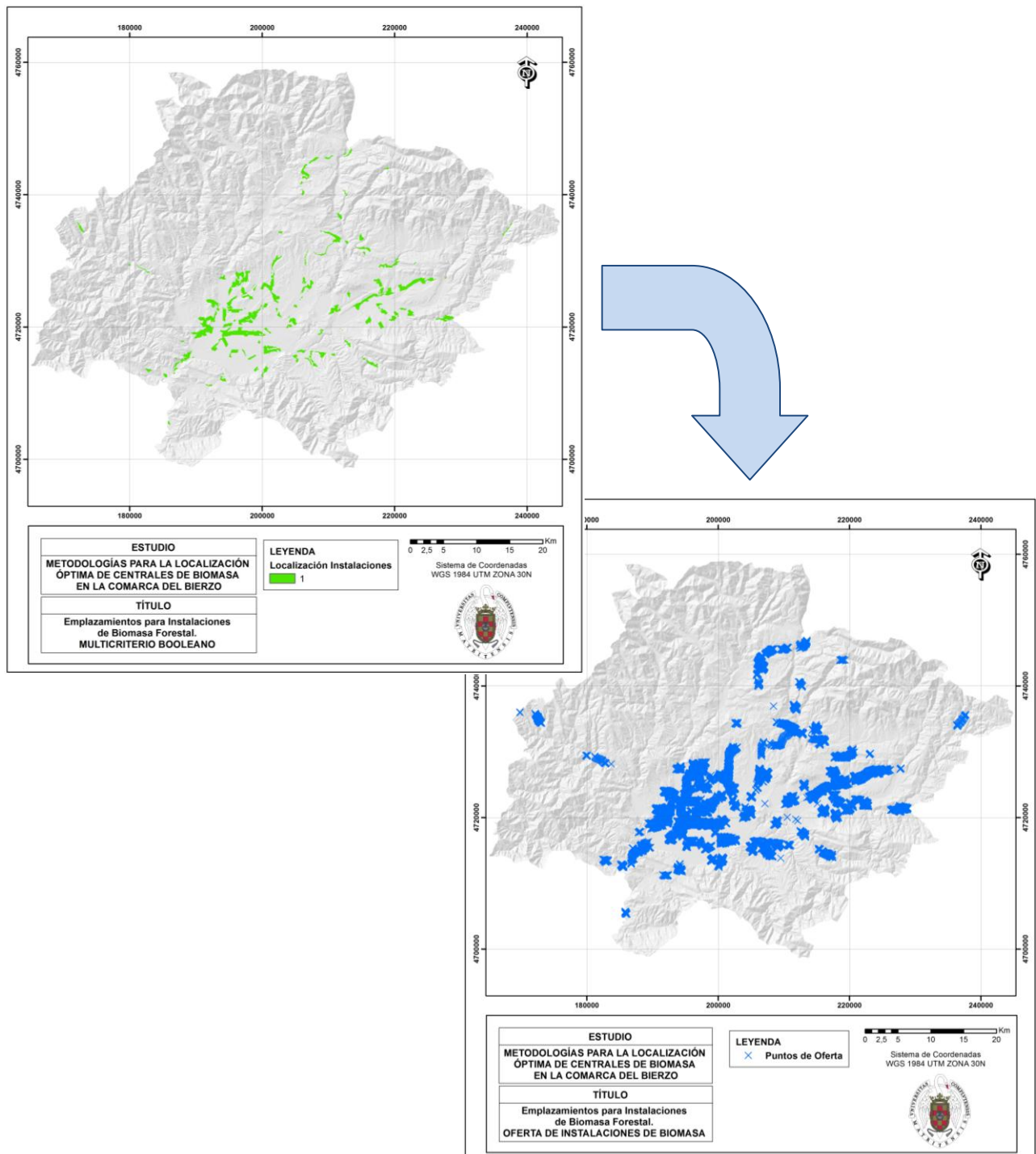


6.1.9. Intersección del conjunto de Restricciones de áreas para las instalaciones de Biomasa Forestal



6.1.10. Resultado de los Emplazamientos para las Instalaciones de Biomasa Forestal (OFERTA)

El resultado final de este análisis Multicriterio Booleano es un raster compuesto de celdas de 100 x 100 m que representan las zonas potenciales donde instalar las centrales de biomasa. Este raster obtenido se transforma en una capa vectorial de puntos (*De Raster a Punto/Raster To Point*) que denominamos Puntos de Oferta de Instalaciones, que posteriormente integraremos en un análisis de redes.



6.1.11. Resumen del Proceso Parcial para la obtención de los Emplazamientos de Instalaciones de Biomasa Forestal (OFERTA)

En el siguiente esquema se muestran los procesos llevados a cabo en *Model Builder* para obtener las ubicaciones más adecuadas para las instalaciones de Biomasa Forestal (OFERTA):



6.1.12. Obtención de soluciones mediante modelos de Localización–Asignación (Análisis de Redes)

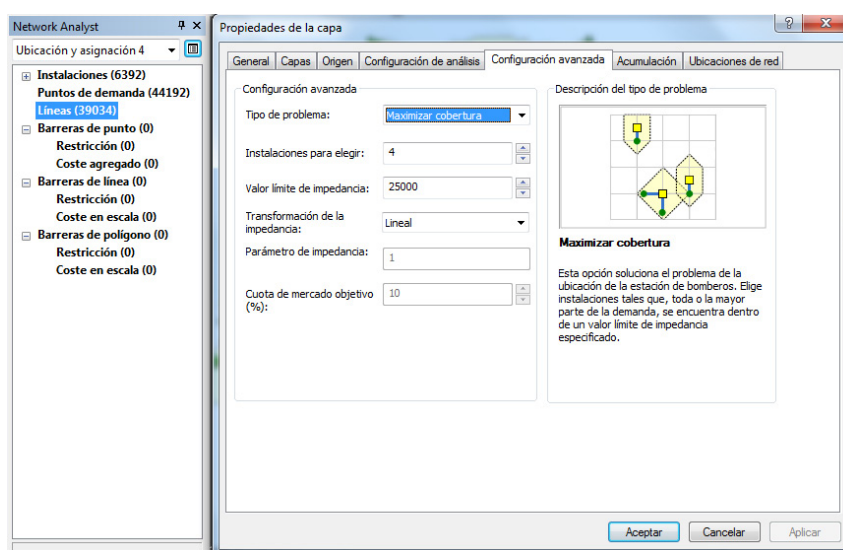
Este es el proceso definitivo que enlaza los dos análisis multicriterio que se han explicado hasta el momento, donde se ha obtenido la localización óptima del recurso, así como la localización de las instalaciones potenciales para su aprovechamiento. El objetivo de este proceso final consiste en el uso de un modelo de localización-asignación que permita ubicar estas instalaciones de modo que su suministro desde los puntos de demanda (recurso) sea lo más eficiente posible.

Otro factor que ha influido en la inclusión de un análisis de redes en la metodología es el coste de transporte de la madera, que representa el 20-40% de su precio en parque de fábrica y que en el caso de la biomasa se acerca al 45%, viéndose más afectado por el menor coeficiente de apilado (COITF, 2011). Mediante este análisis se pueden conocer las distancias de transporte exactas a través de la red viaria. En este trabajo se ha establecido como límite de cobertura para las instalaciones de biomasa (*Valor límite de impedancia*) una distancia de 25 km a través de la red, que ya ha sido utilizada en otros trabajos (García-Martín et al., 2011; Domínguez, 2000), pero mediante radios de distancia.

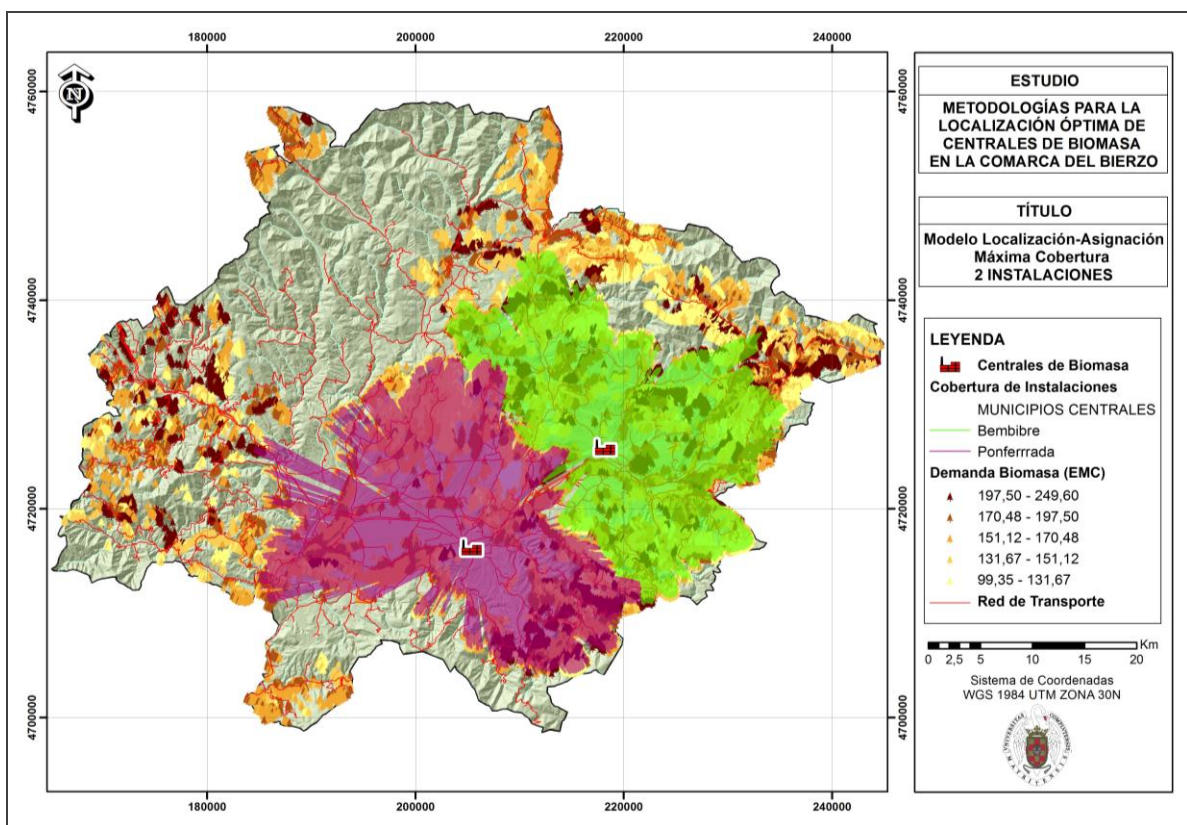
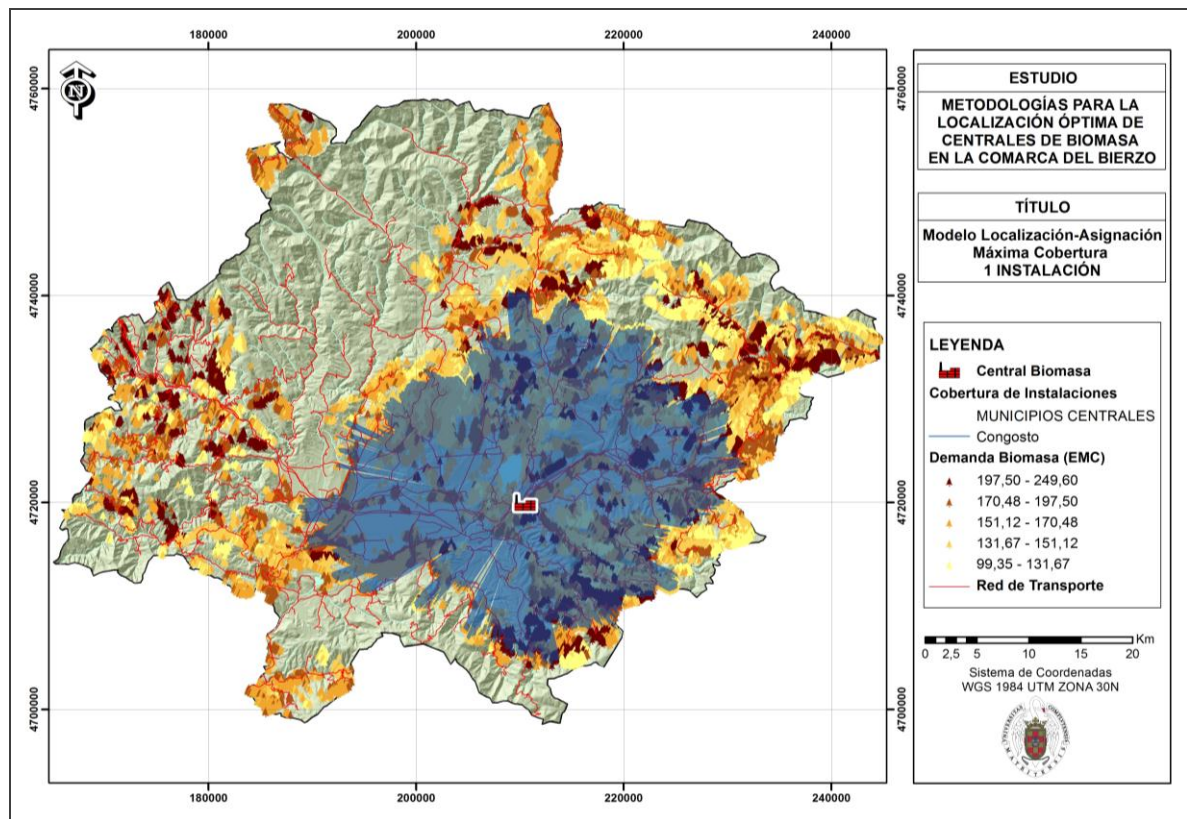
Los elementos del modelo de localización-asignación son los siguientes:

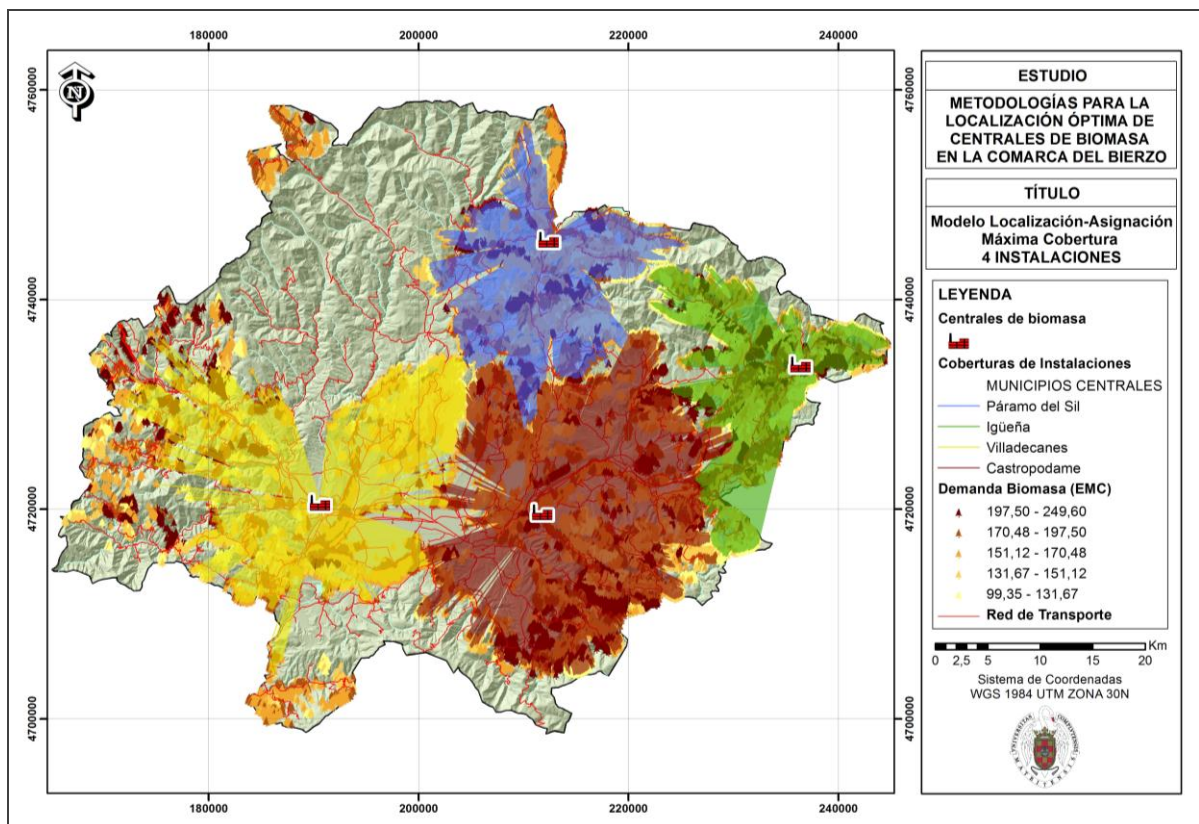
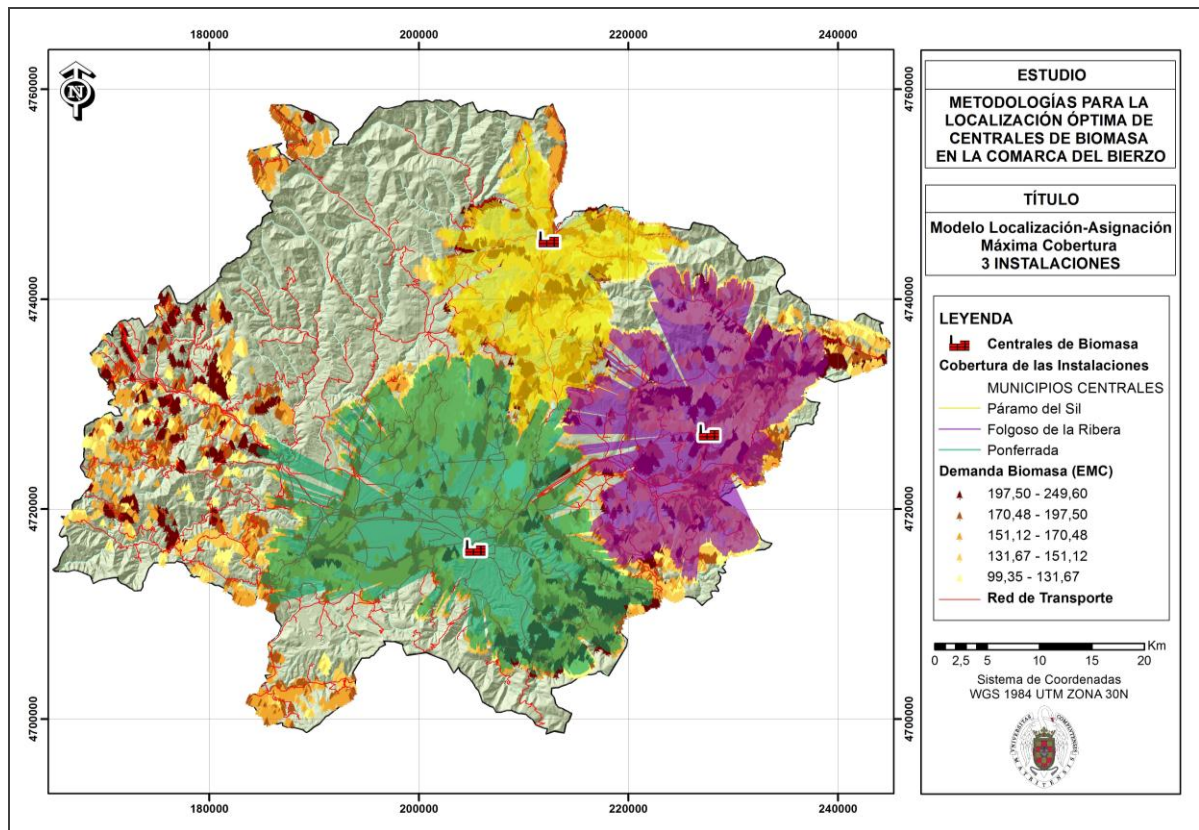
- Puntos de demanda (ponderados): Zonas aptas para el aprovechamiento de Biomasa Forestal
- Puntos de oferta: Emplazamientos óptimos para las instalaciones de Biomasa Forestal
- Cálculo de distancias: A través de la red de transporte

Este estudio pretende aprovechar al máximo la localización de las instalaciones, es decir, que abarquen la mayor demanda posible de Biomasa Forestal, por este motivo se ha seleccionado el análisis de **Maximizar Cobertura** de entre los seis tipos de resolución de problemas que ofrece ArcGIS.



A continuación se muestran las diferentes soluciones obtenidas en función del número de instalaciones a “localizar-asignar” que se introduzcan en el modelo:





Interpretación de los resultados de las soluciones obtenidas

No cabe duda, observando los mapas de las distintas soluciones, que la ubicación más óptima para el emplazamiento de una instalación de Biomasa en la comarca de El Bierzo se localiza en una pequeña zona entorno a los municipios de Ponferrada, Congosto y Castropodame, puesto que aparece como solución en los cuatro modelos de localización-asignación.

El objetivo principal del modelo de localización-asignación aplicado es ubicar emplazamientos óptimos para instalaciones de biomasa, de modo que su suministro desde los puntos de demanda sea lo más eficiente posible. Además de este modelo, en función de los resultados obtenidos, se pueden extraer una serie de datos de las distintas soluciones generadas, como superficies, porcentajes de biomasa cubierta o distancias medias. Estos datos se pueden interpretar a partir de las distintas estadísticas de las capas obtenidas en el análisis:

Modelo de 1 Instalación

En la primera solución obtenida, con una sola Instalación de Biomasa quedarían cubiertas 20.542 ha de las 44.192 ha totales de Biomasa Disponible para la distancia de 25 Km establecida a través de la red de transporte. Por otro lado, esta única central cubriría el 47,5% del total de biomasa forestal disponible, atendiendo a la valoración final de este recurso obtenida en el análisis multicriterio ponderado. La distancia media por la red de transporte desde la instalación de biomasa a los puntos de demanda sería aproximadamente de 18 km.

Modelo de 2 Instalaciones

Este modelo de 2 instalaciones cubriría 29.361 ha aprovechando el 66, 78% de la biomasa valorada en el análisis multicriterio. La distancia media por la red de transporte desde las instalaciones a los puntos de demanda estaría en torno a 16 km.

Modelo de 3 Instalaciones

En el caso de ubicar 3 instalaciones en la comarca de El Bierzo, la biomasa forestal cubierta tendría una superficie de 35.251 ha, ascendiendo a 79,58% la biomasa aprovechable por las 3 centrales. En este caso la distancia media sería de 15,7 km aproximadamente.

Modelo de 4 Instalaciones

Finalmente, para la solución de 4 instalaciones se cubrirían 39.034 ha, aprovechando el 88,24% del total de biomasa forestal disponible. La distancia media por la red de transporte desde las instalaciones a los puntos de demanda estaría en torno a 14,5 km.

6.2. PROCESOS Y RESULTADOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE CENTRALES DE MINIHIDRAÚLICA

Esta metodología se compone de dos modelos distintos que utilizan el mismo proceso de Evaluación Multicriterio (EMC), y cuya diferencia sustancial se basa en los datos de inicio y herramientas aplicadas para estimar el **factor principal** de la EMC. Este factor se corresponde con la fuente energética, que en este caso es el caudal o flujo hídrico que discurre por la red fluvial. A continuación se muestra de forma esquemática los elementos principales que componen ambos modelos:

Tabla 6. Modelos de Metodología para la localización de Centrales de Minihidráulica

MODELOS	FACTOR PRINCIPAL DIFERENCIAL DEL EMC	FACTORES COMUNES DEL EMC	RESTRICCIONES COMUNES DEL EMC
MODELO 1	Caudal Hidroeléctrico Potencial	Desnivel o Salto Bruto Distancia a Subestaciones Eléctricas	Pendientes Red y Subestaciones Eléctricas
MODELO 2	Flujo Acumulado Hidroeléctrico Potencial	Distancia a la Red Eléctrica Hábitats Prioritarios Distancia a Red Fluvial	Red Fluvial Espacios Naturales Protegidos

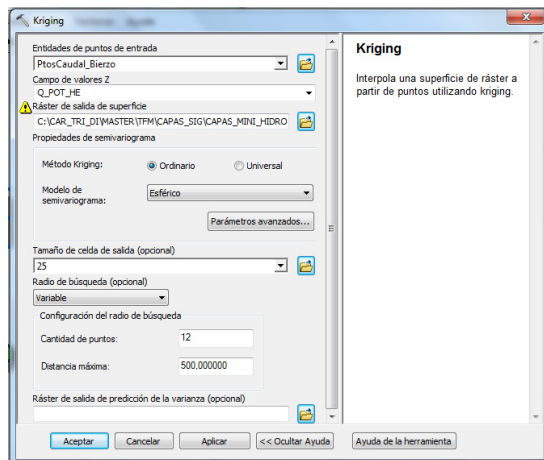
6.2.1 Obtención del Factor Principal (Caudal o Flujo Hidroeléctrico Potencial) para la selección de emplazamientos de Centrales de Minihidráulica

Modelo 1. A partir de datos de caudal obtenidos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil

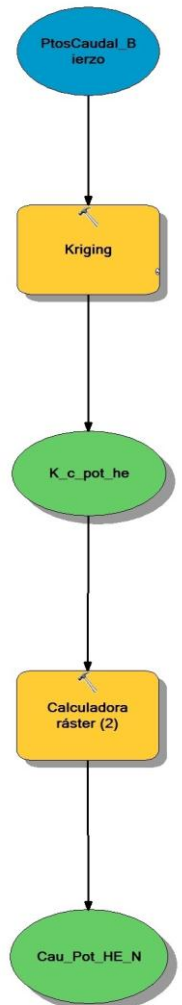
En los aprovechamientos de caudal fluyente no se dispone de ningún tipo de regulación de caudal, por lo que el caudal varía en función del régimen hidrológico anual. Para obtener los puntos de caudal con mayor potencial hidroeléctrico sin perjuicio del hábitat fluvial, se ha tenido en cuenta la normativa del Plan Hidrológico de la Cuenca del Norte que establecía que el caudal mínimo medioambiental a circular por el cauce no será inferior a un décimo del caudal medio interanual, con un mínimo de 50 litros/segundo en ríos con caudales permanentes todo el año, o la totalidad del caudal natural fluyente, si éste fuese menor a un décimo o a 50 litros/segundo. Por este motivo, se han calculado en función de esta normativa los caudales hidroeléctricos potenciales a partir de los datos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, incorporándolos posteriormente a la cobertura de puntos de caudal en formato *shape*.

Para la obtención de datos de caudales continuos en formato *raster* a lo largo de los cursos fluviales de la zona de estudio, se ha recurrido a una técnica geoestadística de interpolación, el método Kriging. Este método de interpolación parte del principio de que los puntos próximos en el espacio tienden a tener valores más parecidos que los puntos más distantes. Para elaborar el ajuste, se basa en modelos matemáticos y estadísticos que incluyen probabilidad para la predicción de los nuevos valores,

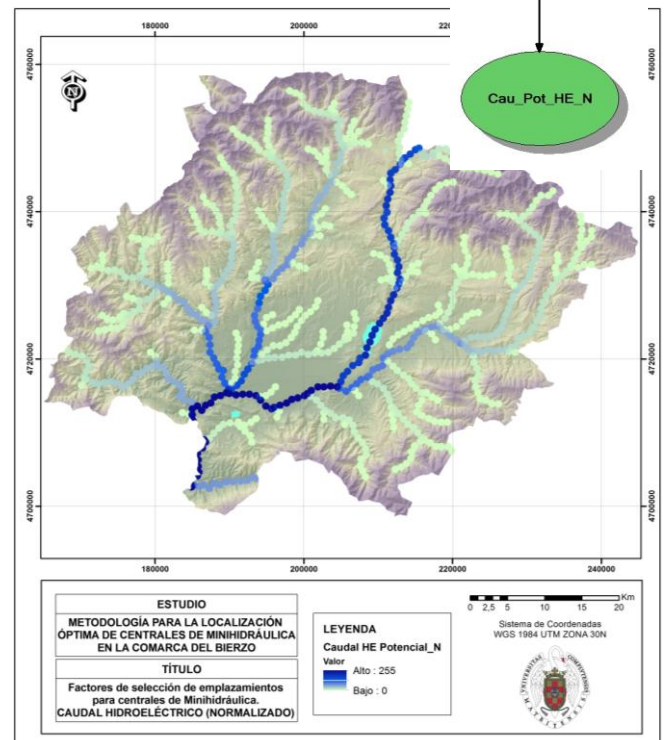
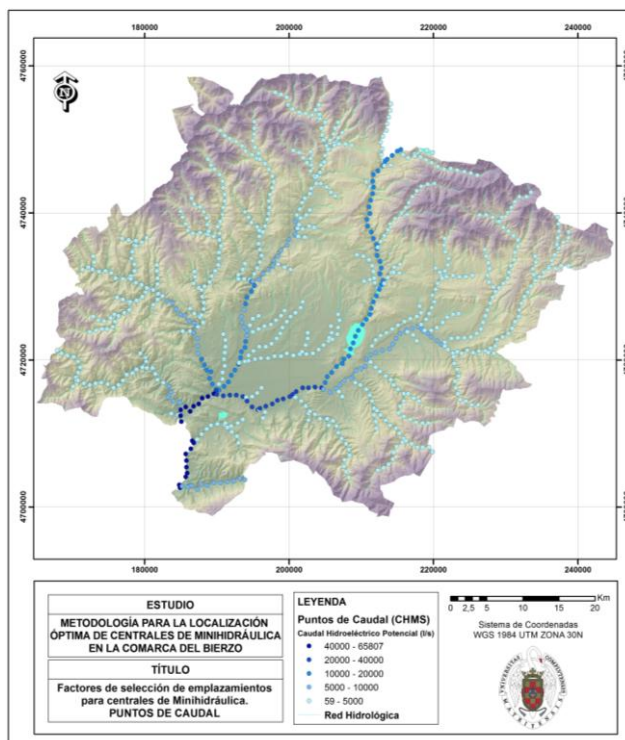
calculándose también su error. Esta técnica se describe más detenidamente en el modelo a partir de datos pluviométricos para la obtención de la Precipitación Media Mensual interpolada.



El programa ArcGIS incluye esta técnica de interpolación mediante una herramienta de análisis espacial denominada Kriging. Para obtener esta interpolación en este caso, se ha usado la opción que por defecto propone ArcGIS para el método Kriging, modificando únicamente la distancia máxima de interpolación (500 m.), puesto que la separación espacial de los puntos de caudal no supera el medio kilómetro.



Finalmente, para obtener el factor de Caudal Hidroeléctrico Potencial, el *raster* generado en la interpolación se normaliza mediante la ecuación lineal que se describe en la metodología, implementada en ArcGIS (*Calculadora Raster /Raster Calculator*). A continuación se muestran el esquema en *Model Builder* de los procesos llevados a cabo para obtener el caudal hidroeléctrico potencial normalizado, así como los mapas de puntos de caudal y el *raster* final de este factor:



Modelo 2. A partir de datos pluviométricos y del modelo digital del terreno de la zona de estudio, aplicando herramientas de hidrología del software ArcGIS.

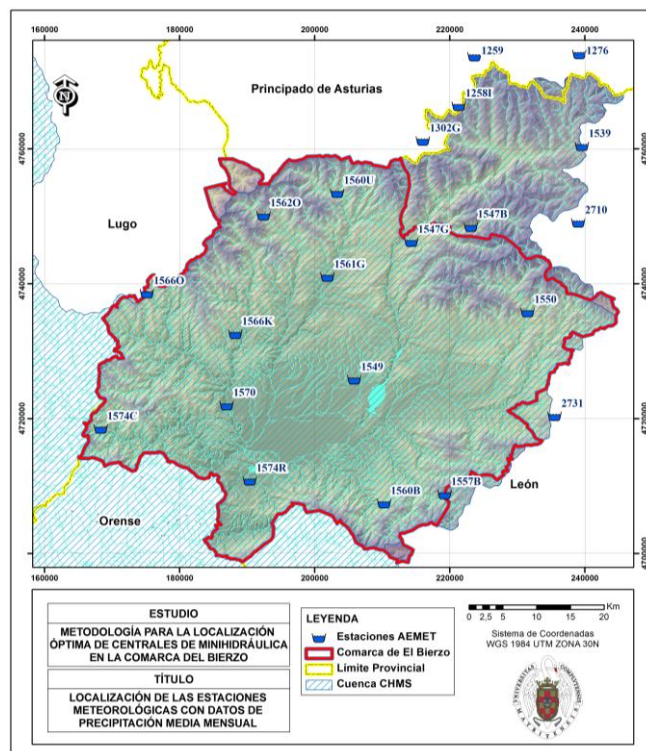
Este modelo resulta algo más complejo que el anterior, puesto que no se cuenta con datos de caudales reales, sino que se parte de datos de pluviometría media mensual y del MDT de la zona de estudio. Esta información se introduce en ArcGIS, donde se aplican herramientas de hidrología con las que se obtiene como resultado final un flujo acumulado hidroeléctrico que una vez normalizado se incorpora al análisis multicriterio como un factor más.

Los datos de pluviometría media mensual se han extraído del Sistema de Información Geográfico Agrario, (SIGA) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Este sistema cuenta con información de las estaciones meteorológicas del AEMET, siendo la información sobre pluviometría media mensual elaborada a partir de las series de datos pluviométricos entre 1960 y 1996. Para este estudio se ha contado con los datos pluviométricos de las siguientes estaciones:

Tabla 7. Estaciones Meteorológicas con datos de pluviometría media anual

Nombre	Clave	Provincia	Tipo	Altitud (m)	Latitud		Longitud		Orientación	Precipitación Media Mensual Anual (mm)
					(°)	(')	(°)	(')		
CARUCEDO	1574R	León	TERMOPLUVIOMÉTRICA	523	42	29	06	45	W	708,6
CORULLON	1570	León	PLUVIOMÉTRICA	535	42	34	06	48	W	891,4
EL PORTELO	1566O	León	PLUVIOMÉTRICA	1.080	42	44	06	57	W	1293,0
FABERO LA CORTINA	1561G	León	TERMOPLUVIOMÉTRICA	652	42	46	06	38	W	856,8
GESTOSO	1574C	León	PLUVIOMÉTRICA	930	42	32	07	02	W	1.521,0
IGUEÑA	1550	León	PLUVIOMÉTRICA	919	42	43	06	16	W	1.265
LABOR DEL REY	1557B	León	TERMOPLUVIOMÉTRICA	1.420	42	29	06	24	W	1.076,0
MANZANAL DEL PUERTO	2731	León	PLUVIOMÉTRICA	1.160	42	35	06	13	W	726,0
MURIAS DE PAREDES	2710	León	PLUVIOMÉTRICA	1.261	42	51	06	11	W	868,3
PARADASECA ENDESA	1566K	León	PLUVIOMÉTRICA	740	42	41	06	48	W	1.010,0
PARAMO DEL SIL	1547G	León	PLUVIOMÉTRICA	870	42	49	06	29	W	1.146,0
PERANZANES	1560U	León	PLUVIOMÉTRICA	937	42	52	06	38	W	1.539,0
PIEDRAFITA DE BABIA	1539	León	PLUVIOMÉTRICA	1.200	42	57	6	11	W	1.038,0
PONFERRADA	1549	León	TERMOPLUVIOMÉTRICA	550	42	38	06	34	W	660,1
SAN CRISTOBAL DE VALDUEZA	1560B	León	PLUVIOMÉTRICA	1.100	42	27	06	31	W	930,9
TEJEDO DE ANCARES	1562O	León	PLUVIOMÉTRICA	970	42	50	06	45	W	1.963,0
VALSECO	1547B	León	PLUVIOMÉTRICA	1.050	42	50	06	23	W	1.366,0
GENESTOSO	1259	Asturias	PLUVIOMÉTRICA	1.180	43	03	06	23	W	1.477,0
PUERTO DE LEITARIEGOS 'PUEBLO'	1258I	Asturias	TERMOPLUVIOMÉTRICA	154	42	59	6	25	W	1.562,0
EL VALLE DE SOMIEDO	1276	Asturias	TERMOPLUVIOMÉTRICA	1.240	43	4	6	12	W	1.271,0

Se ha contado con estaciones meteorológicas ubicadas fuera de la comarca de El Bierzo, puesto que para generar el flujo acumulado de la zona de estudio se debe considerar el flujo procedente de toda la cabecera de la cuenca del río Sil y sus afluentes situados en la comarca de Laciana e incluso en Asturias.



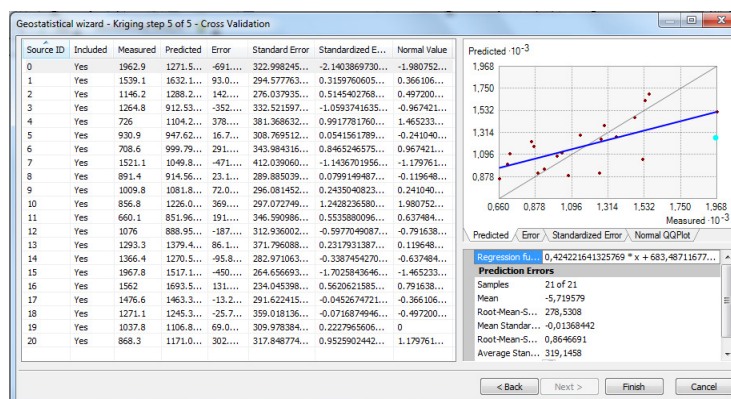
Para la obtención de datos de precipitación media anual continuos en formato raster a lo largo de los cursos fluviales de la zona de estudio, se ha recurrido a una técnica geoestadística de interpolación, el **método Kriging**.

El Kriging estudia la autocorrelación de la variable a interpolar, por lo que cuando se muestra la superficie resultante se tiene en cuenta el grado y el tipo de autocorrelación o dependencia espacial existente en la variable. El objetivo de Kriging consiste en estimar el valor de una variable aleatoria (Z) en uno o más puntos no muestreados o sobre grandes bloques, a partir de datos más o menos distribuidos en una plataforma determinada. Los datos pueden estar distribuidos en una, dos o tres dimensiones aunque sus aplicaciones en problemas medioambientales suelen ser bidimensionales.

El Kriging Ordinario es el que se aplica más comúnmente. Asume que la media es desconocida.

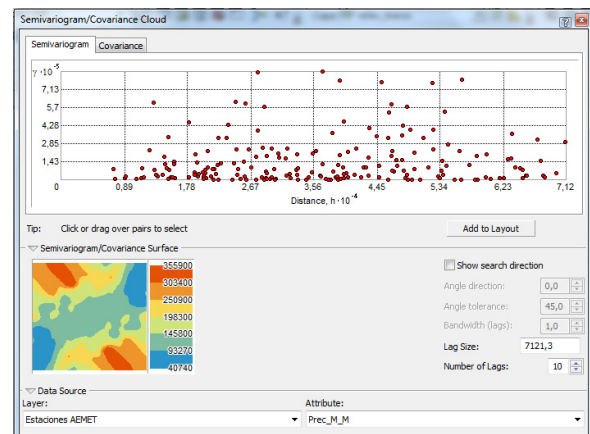
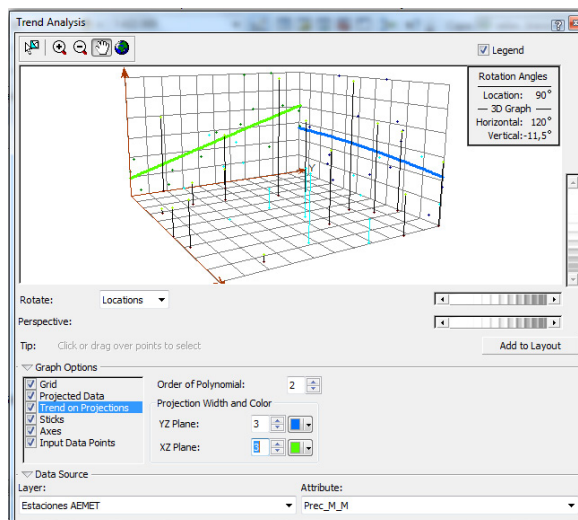
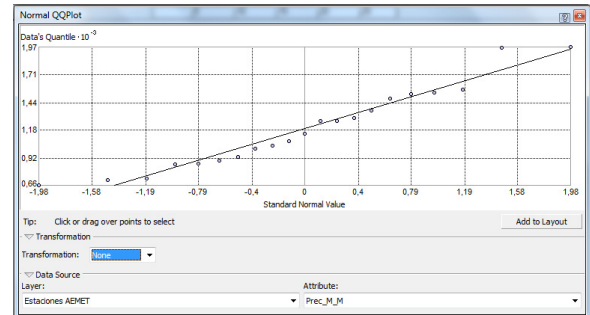
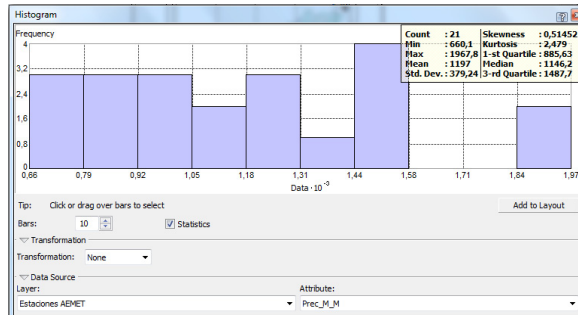
Kriging ordinario por defecto

En primer lugar se va a generar una superficie de interpolación de los datos de precipitación con las opciones que por defecto propone el ArcGIS. A continuación se muestra el gráfico de validación cruzada para esta opción:

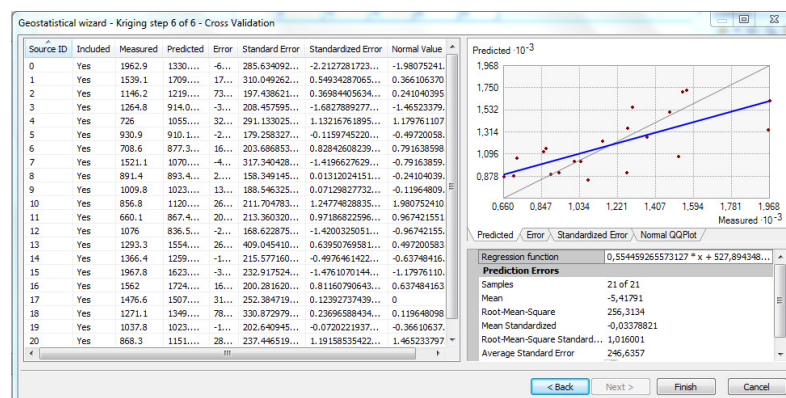


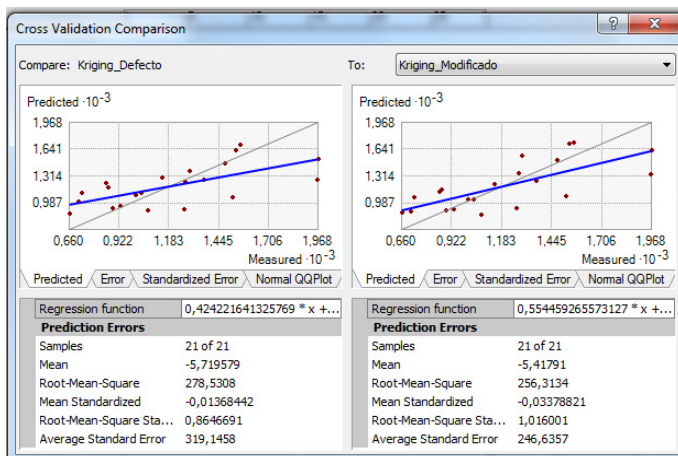
Kriging ordinario modificado

Se ha realizado un análisis exploratorio de los datos para comprobar si la distribución es normal, el cual ha sido tenido en cuenta para ajustar mejor el modelo.



La validación cruzada del modelo da como resultado una media estandarizada de -0,03 y un error cuadrático medio estandarizado de 1,01:

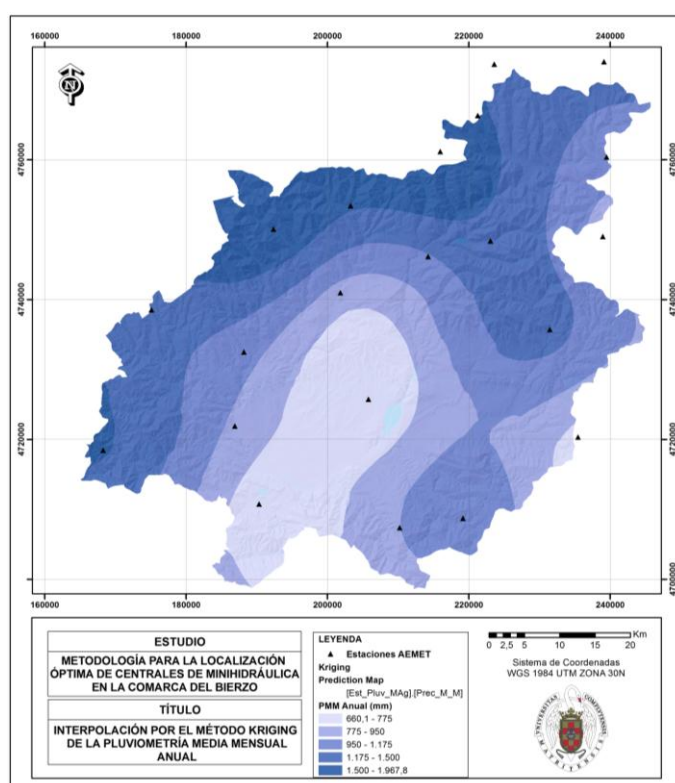




Si comparamos el Kriging por defecto con el modificado, se observa que el error cuadrático medio estandarizado y el error medio estandarizado son mejores en el kriging modificado que en la versión por defecto. Aunque se debe detallar que la media estandarizada es un poco mejor en el modelo que utiliza ArcGIS por defecto.

Atendiendo a los resultados obtenidos, se ha optado por la utilización del modelo de kriging ordinario modificado para incorporarlo al análisis de obtención del flujo hidroeléctrico potencial.

Una vez obtenido el *raster* de precipitaciones, se ha procedido a calcular el flujo acumulado a partir del MDT de la zona estudio mediante las herramientas de hidrología que incluye ArcGIS. El primer paso es detectar los sumideros del MDT original con la herramienta *Crear Sumidero/Sink*. Un sumidero suele ser un valor incorrecto inferior a los valores circundantes. Para garantizar una representación cartográfica del drenaje adecuada, estas depresiones se pueden rellenar con la herramienta *Rellenar/Fill*.



Una vez corregidos los sumideros, generamos primero un mapa *raster* de las direcciones de flujo de la red fluvial de la zona de estudio (*Dirección de Flujo/Flow Direction*), y posteriormente derivado de éste, se crea otro *raster* con la acumulación de flujo. Mediante esta herramienta (*Acumulación de Flujo/ Flow Accumulation*) se incorpora el *raster* de precipitaciones elaborado con la interpolación mediante Kriging, que le da peso a este factor y permite establecer una hipótesis del caudal acumulado que discurre por la red fluvial de la zona de estudio.

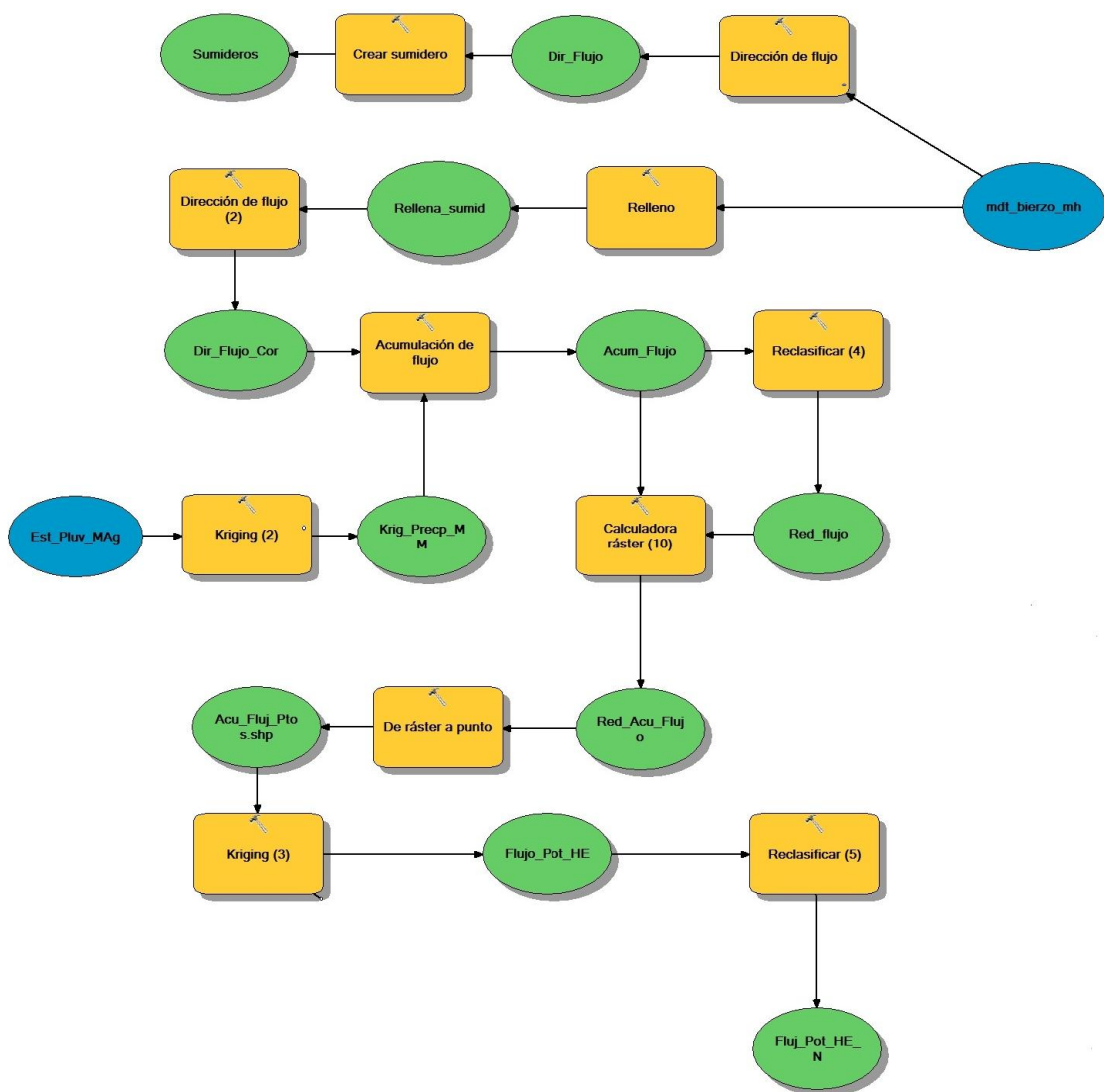
Para permitir una superposición suficiente entorno a la red fluvial con el resto de factores del análisis multicriterio que se describen en el siguiente apartado, se han realizado una serie de procesos que

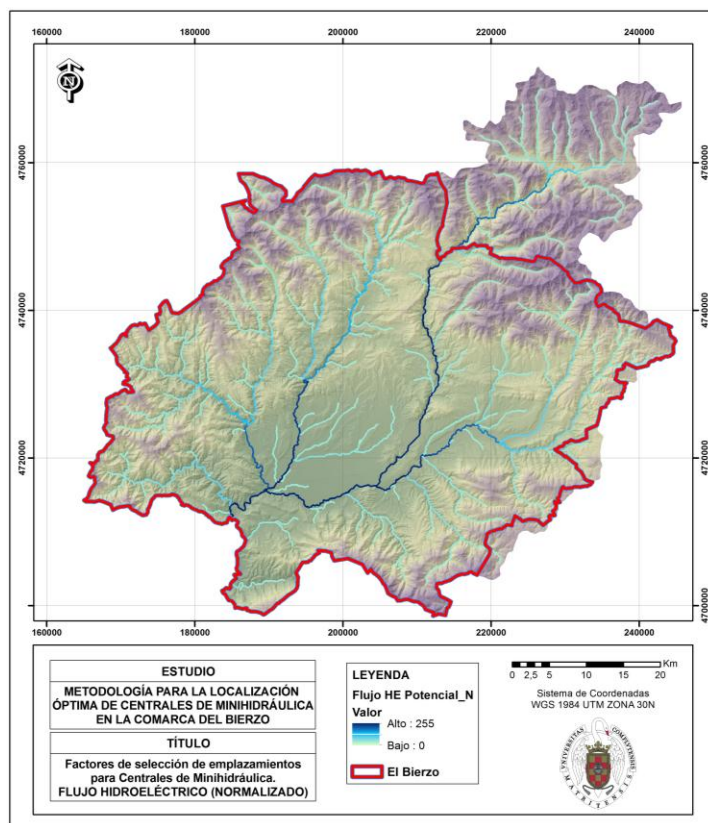
permitían ampliar el *raster* de acumulación de flujo que es 25 m. de ancho (una celda de 25x25) a una anchura de 100 m. desde el eje en todos los cauces, manteniendo los valores iniciales de acumulación:

1. Se convierte el raster de acumulación de flujo (solo los cauces) a una capa vectorial de puntos (*De Raster a Punto/Raster To Point*).
2. Para obtener un *raster* que permita una superposición suficiente, se ha optado por llevar a cabo una interpolación con la capa de puntos mediante Kriging, usando la opción que por defecto propone ArcGIS, modificando únicamente la distancia máxima de interpolación (100 m).

Finalmente el raster obtenido mediante la interpolación se normaliza en valores que oscilan de 0 a 255 mediante la herramienta *Reclasificar/Reclassify*, generando el factor de Flujo Hidroeléctrico Potencial.

A continuación se muestran el esquema en *Model Builder* de los procesos llevados a cabo para obtener el flujo hidroeléctrico potencial normalizado, así como el mapa *raster* normalizado de este factor:



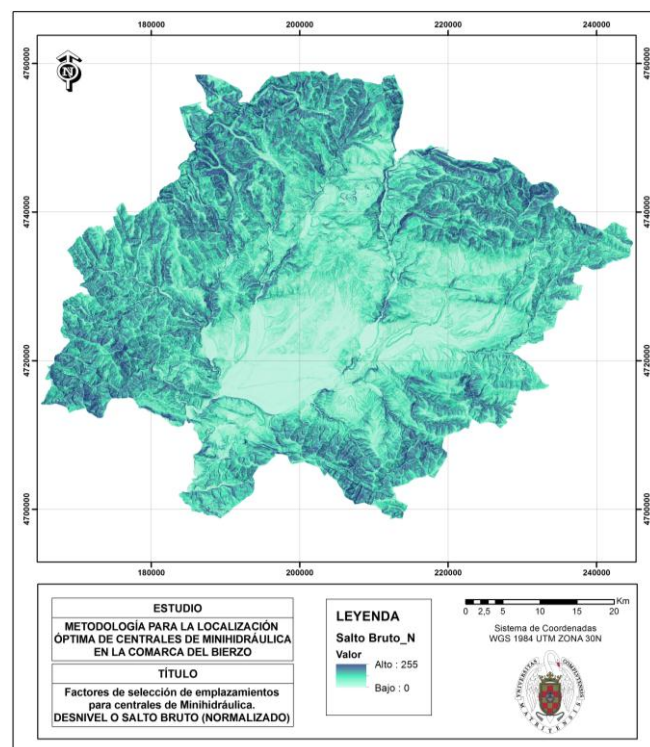


6.2.2 Obtención de los Factores Comunes para la selección de emplazamientos de Centrales de Minihidráulica

Desnivel o salto bruto

Una zona de elevada pendiente nos permite optimizar la generación de la potencia hidroeléctrica, puesto que se minimizan los costes de las instalaciones (menos longitud de canales y tuberías, etc.), así como su impacto ambiental.

Las pendientes se han obtenido a partir de un MDT de la zona del Bierzo, formado por un mosaico de varios MDTs (tamaño celda de 25x25 m.). Este *raster* se ha utilizado, finalmente, para obtener las pendientes mediante la herramienta “*Pendiente/Slope*”. Posteriormente el raster es normalizado (*Calculadora Raster /Raster Calculator*).

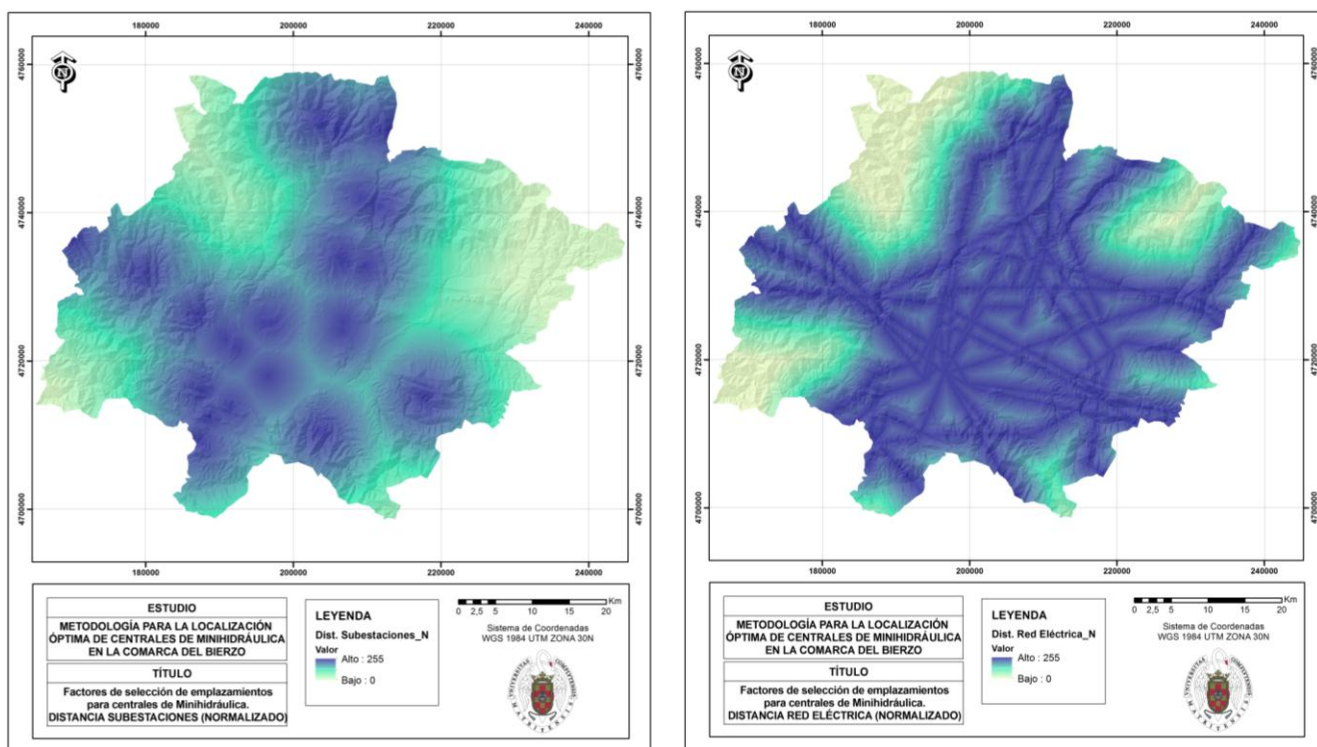


Distancia a Subestaciones y Red Eléctrica

Es interesante que la localización de la central de minihidroeléctrica este lo más cerca posible a la red eléctrica existente, puesto que una ubicación alejada de la infraestructura eléctrica conlleva un gasto adicional de conexión que puede hacer inviable el proyecto. Además, la realización de una nueva línea eléctrica implica impactos ambientales sobre los recursos naturales, sociales y culturales (desbroce de la vegetación, construcción de torres, etc.), siendo estas afecciones más significativas a mayor longitud de la línea.

A la hora de hacer el análisis se ha valorado por separado la distancia a las subestaciones y a la red eléctrica, puesto que la conexión a la red eléctrica necesita de una transformación previa (cambio de tensión), que comporta un mayor coste técnico y ambiental que la conexión a una subestación, dándole un peso más elevado a esta última opción en la suma ponderada.

Ambos factores se obtienen mediante la herramienta “*Distancia Euclideana/Euclidean Distance*” sobre las capas de subestaciones y red eléctrica. Como este factor depende de la distancia, se le ha realizado el ajuste opuesto para que las localizaciones más próximas a estas infraestructuras tomen valores más elevados. Posteriormente ambos *rasters* son normalizados (*Calculadora Raster /Raster Calculator*), como se muestra a continuación:



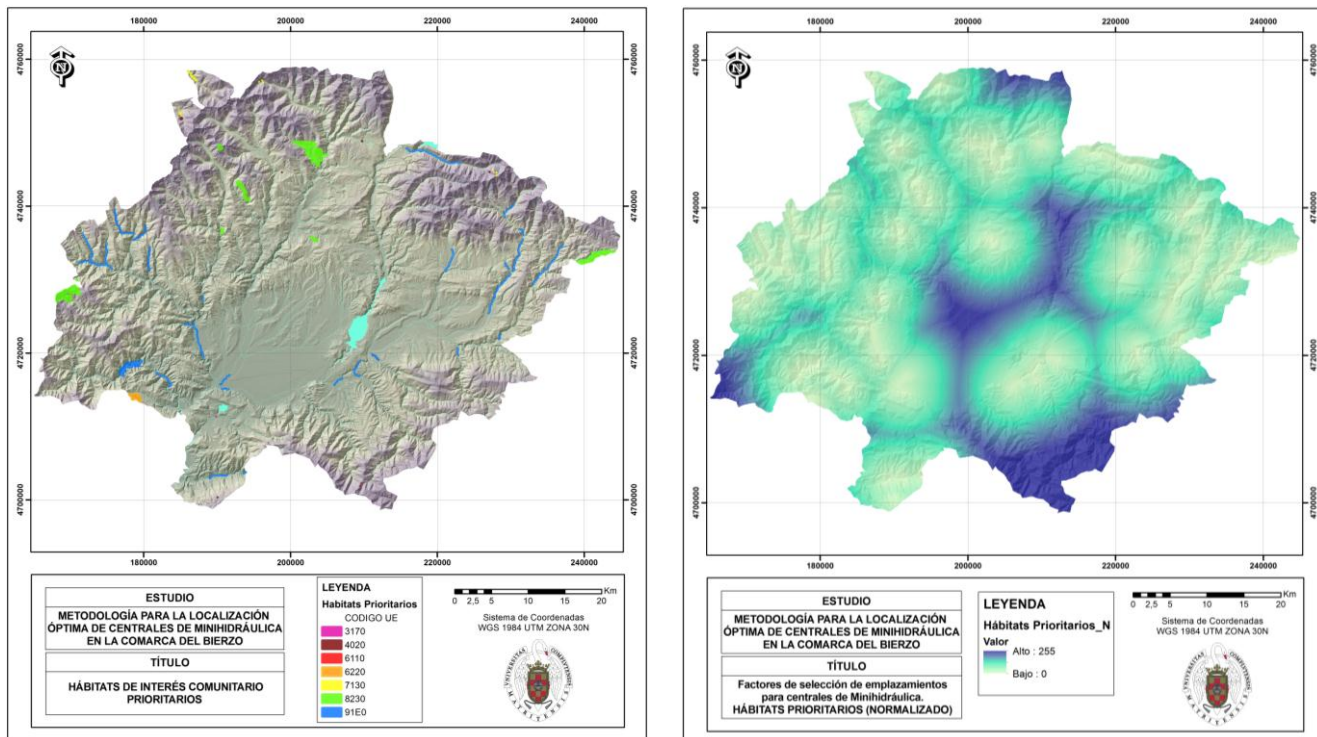
Hábitats de Interés Comunitario Prioritarios

Los hábitats de interés comunitario se incluyen en el anexo I de la Directiva 92/43/CEE, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la flora y fauna silvestres "Directiva Hábitats". Dentro de los hábitats de interés comunitario se califican como prioritarios los que están amenazados de desaparecer, por ello su preservación implica una responsabilidad por parte de la Unión Europea. En la zona de estudio existen varios hábitats calificados como prioritarios, estando en su mayoría asociados a ecosistemas riparios, lo que puede conllevar un posible impacto ambiental en caso de afección a estos espacios, por lo que se ha optado por incluirlos como un factor en este análisis ponderado. En la zona de estudio encontramos los siguientes hábitats prioritarios:

Tabla 8. Hábitats de Interés Comunitario y su Código

TIPO DE HÁBITAT	CODIGO UE HÁBITAT
<i>Gymnadenio-Ericetum tetralicis</i>	7130
<i>Genisto anglicae-Ericetum tetralicis</i>	4020
<i>Agrostio duriaei-Sedetum pyrenaici</i>	8230
<i>Galio broteriani-Alnetum glutinosae</i>	91E0
<i>Poo bulbosae-Trifolietum subterranei</i>	6220
<i>Sisymbrello asperae-Preslietum cervinae</i>	3170
<i>Cerastietum pumili</i>	6110

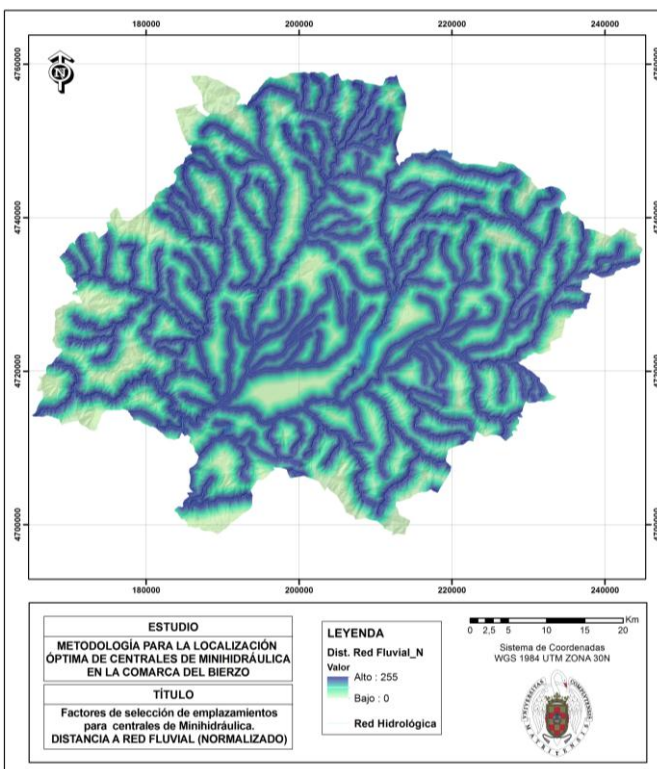
Este factor se obtiene mediante la herramienta “*Distancia Euclideana/Euclidean Distance*” sobre las capas de hábitats. Posteriormente el *raster* se normaliza (*Calculadora Raster /Raster Calculator*), como se muestra a continuación:



Distancia a la Red Fluvial

Obviamente, la localización de la central de mini-hidráulica tiene que estar próxima al curso de agua donde se realice el aprovechamiento, puesto que una ubicación muy alejada de las instalaciones de la central haría inviable el proyecto.

Este factor se obtiene mediante la herramienta “Euclidean Distance” sobre la red fluvial de la zona de estudio. Como este factor depende de la distancia, se le ha realizado el ajuste opuesto para que las localizaciones más próximas a los cursos fluviales tomen valores más elevados. Posteriormente el *raster* se normaliza (*Calculadora Raster /Raster Calculator*), como se muestra a continuación:



6.2.3. Asignación de Pesos a cada Factor

Una vez obtenidos los factores normalizados, se les asigna un peso en función de su importancia desde el punto de vista técnico y ambiental, para así obtener un *raster* ponderado de aquellas zonas con una capacidad de acogida más alta para la ubicación de centrales de Minihidráulica:

Tabla 9. Pesos asignados a cada factor

FACTORES		INDICADOR		PESO
Caudal (Modelo 1)	Flujo (Modelo 2)	Caudal hidroeléctrico potencial (Modelo 1)	Flujo acumulado hidroeléctrico potencial (Modelo 2)	0,30
Salto Bruto		Desnivel en porcentaje		0,25
Subestaciones Eléctricas		Distancia a Subestaciones Eléctricas		0,15
Red Eléctrica		Distancia a la Red Eléctrica		0,10
Hábitats Prioritarios		Lejanía Hábitats Prioritarios		0,15
Red Fluvial		Distancia a Red Fluvial		0,05

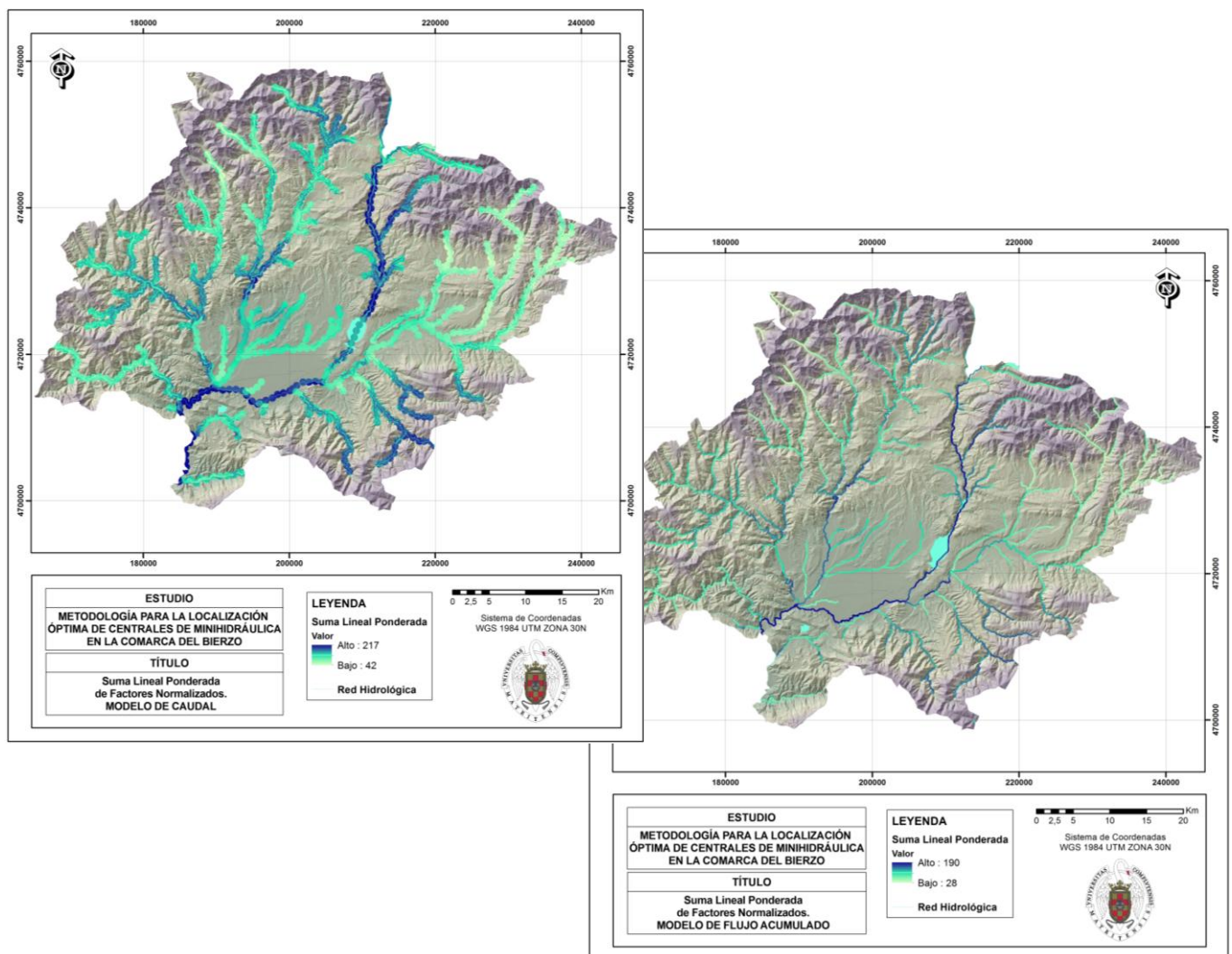
El mayor peso, se le asigna al caudal o al flujo acumulado según el modelo, puesto que esta energía renovable se aprovecha de este factor junto con el desnivel para obtener energía. Por este motivo también se le asigna al salto bruto un peso importante. Se ha fijado un peso medio a la distancia a subestaciones eléctricas, aunque algo superior al factor de distancia a la red, debido al mayor coste de conexión de este último que se ha descrito anteriormente. También se ha establecido un peso medio a los hábitats prioritarios, puesto que puede suponer una afección importante sobre estas zonas

protegidas en caso de ubicar una central en su ámbito. Finalmente, se le ha dado un peso algo menor a la distancia a la red fluvial, puesto que este factor está ya muy limitado por la restricción que se describe más adelante, que excluye aquellas zonas que estén más alejadas de 100 m al cauce del río.

6.2.4. Suma Lineal Ponderada

El resultado que se obtiene en este método de análisis multicriterio es un sumatorio de los factores normalizados multiplicados por su correspondiente peso. El producto gráfico final es un *raster* ponderado con las zonas con una capacidad de acogida más alta para la ubicación de centrales de Minihidráulica, que permite conocer aquellas zonas más adecuadas, así como las menos idóneas para el aprovechamiento de este recurso energético.

Esta operación se realiza mediante una herramienta de *Spatial analyst* denominada Suma Ponderada (*Weight Sum*). A continuación se muestran los *rasters* de la Suma Lineal Ponderada de los 2 modelos estudiados:



6.2.5. Restricciones de emplazamientos para las Centrales de Minihidráulica

Las capas de restricciones se han obtenido mediante consultas con la herramienta “*Calculadora Raster /Raster Calculator*”. Después, dichas capas se han reclasificado (*Reclasificar/Reclasify*) de manera que se ha dado el valor 1 a las zonas no restringidas y el valor NoData al resto.

Restricción Pendientes

Se ha estimado que aquellas pendientes inferiores al 5% se traducen en un salto bruto de pequeña altura, por lo que se han excluido del análisis aquellos porcentajes de pendientes inferiores a este valor mediante la *Calculadora Raster*.

Restricción Red Eléctrica

En este caso se adoptado la misma restricción que la estipulada para las instalaciones de Biomasa por los mismos motivos técnicos y ambientales, incluso se han estimado las mismas distancias de eficiencia, 1.000 m a subestaciones eléctricas, y 500 m para la conexión a la red de alta tensión (*Zona de Influencia/Buffer*).

Restricción Red Fluvial

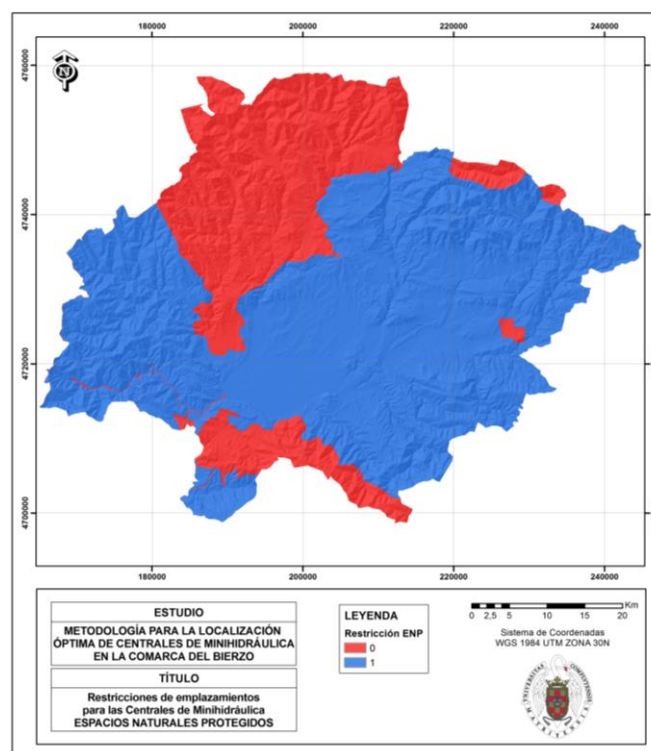
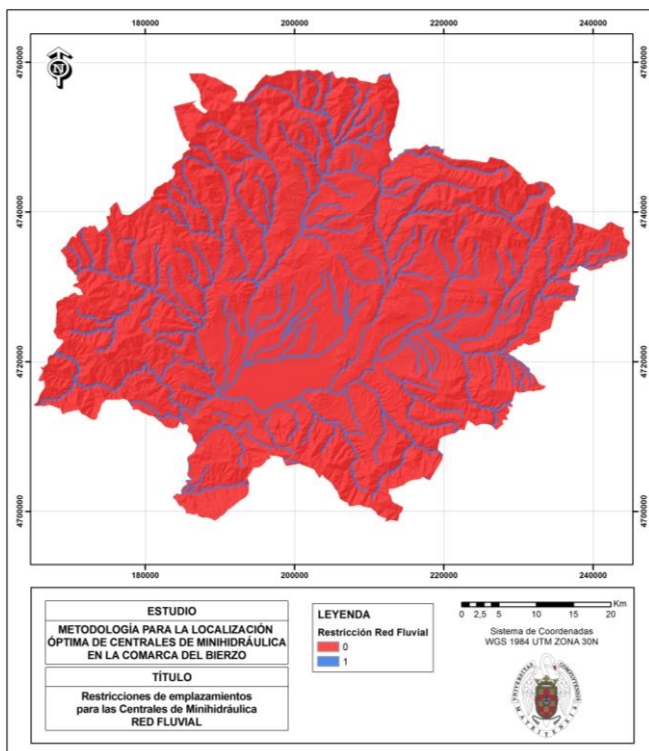
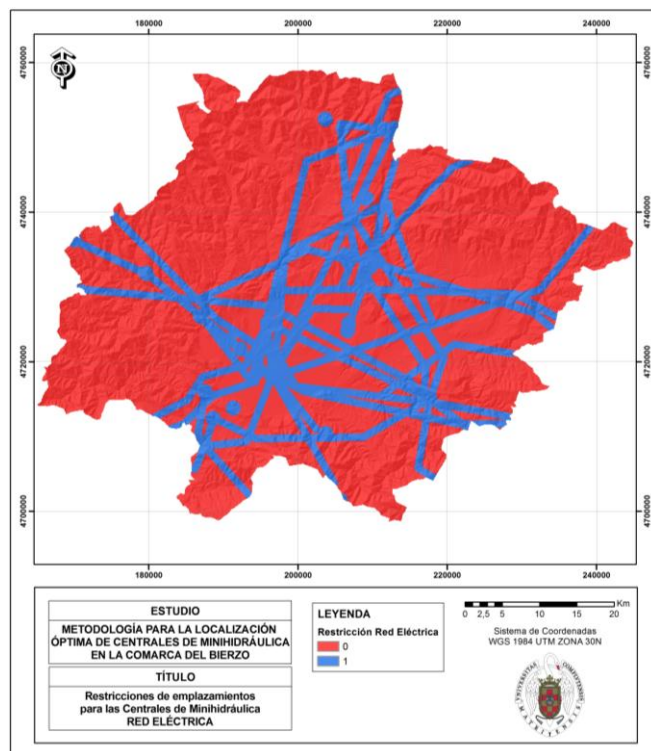
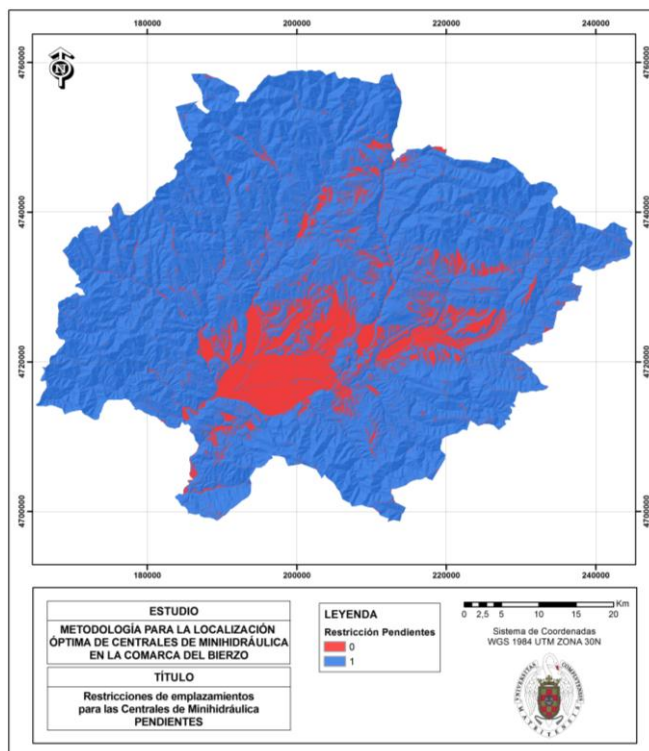
Como es evidentemente, la localización de la central de mini-hidráulica tiene que estar próxima al curso de agua donde se realice el aprovechamiento. En este sentido se ha estimado que una distancia superior a 100 m supone la inviabilidad del aprovechamiento, por lo que se ha considerado excluir aquellas zonas que estén más alejadas de esta longitud mediante la *Calculadora Raster*.

Restricción de Espacios Naturales Protegidos

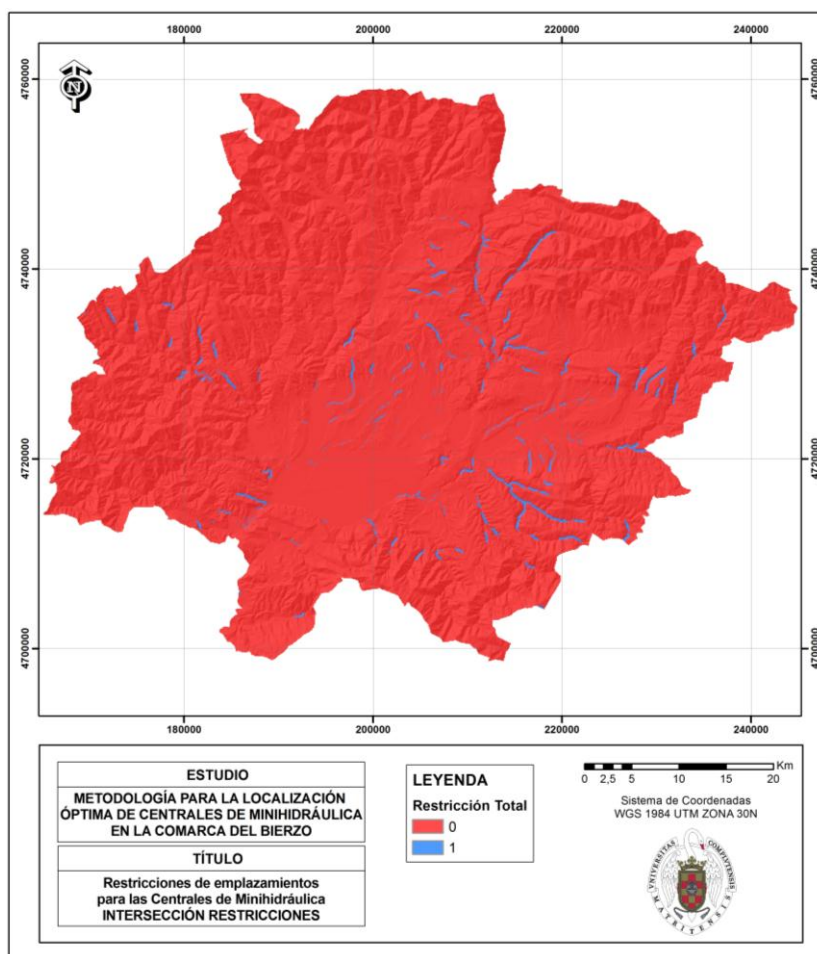
Al igual que en el caso de la selección de emplazamientos para la localización de instalaciones de Biomasa, se ha optado por excluir aquellos espacios naturales que presentan protección por cualquier Administración competente.

Para obtener esta restricción en primer lugar se ha convertido la capa vectorial de Espacios Naturales Protegidos a raster (*Poligono a Raster /Polygon to Raster*), y posteriormente se ha realizado una reclasificación de este *raster* (*Reclasificar/Reclasify*) asignando el valor 0 de exclusión a todos los espacios protegidos.

A continuación se muestran los mapas *raster* de las 4 restricciones incluidas para la selección de emplazamientos destinados a instalaciones de Minihidráulica:



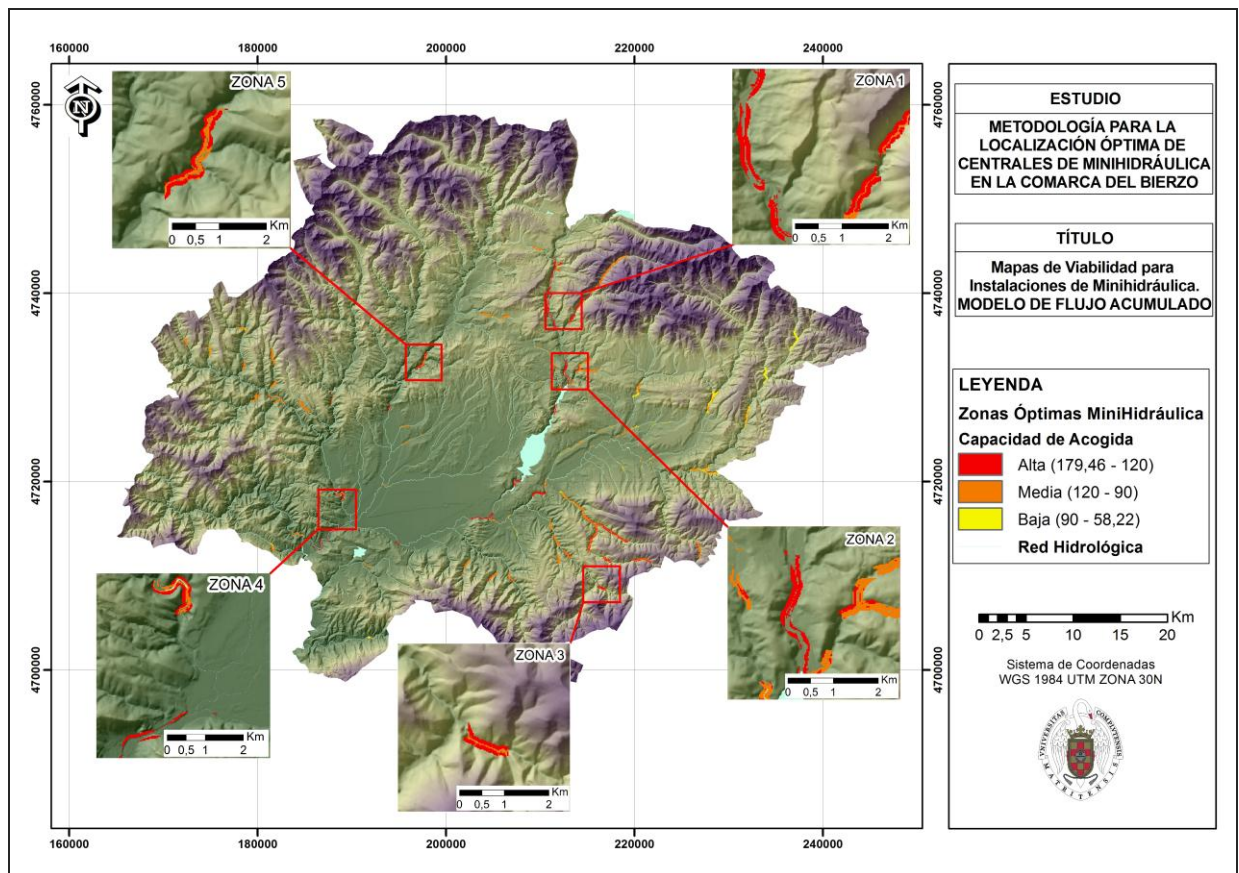
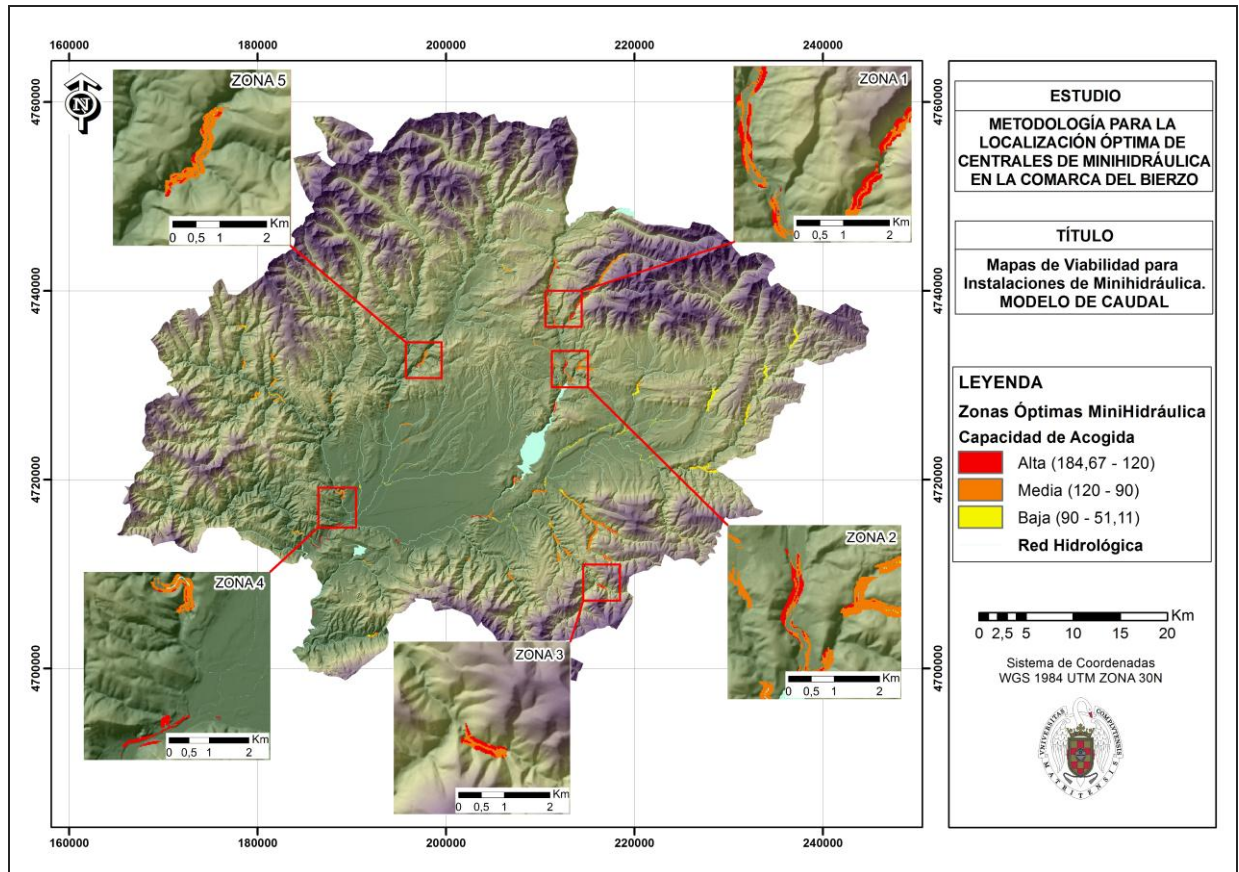
6.2.6. Intersección del conjunto de Restricciones de emplazamientos para las Centrales de Minihidráulica



6.2.7. Resultado de Emplazamientos Óptimos para la Instalación de Centrales de Minihidráulica

A través de la herramienta “*Calculadora Raster/Raster Calculator*” se multiplica el resultado de la SLP por el producto de la intersección de las restricciones, obteniendo como resultado final del análisis Multicriterio un *raster* con las zonas con una capacidad de acogida ponderada para la ubicación de centrales de Minihidráulica, así como las aéreas excluidas del análisis.

A continuación se presentan dos Mapas de Viabilidad para instalaciones de Minihidráulica en la comarca de El Bierzo, que se corresponden con los dos modelos explicados en esta metodología. Se han incluido ampliaciones de las zonas que presentan una capacidad de acogida más alta para las instalaciones de esta energía renovable:



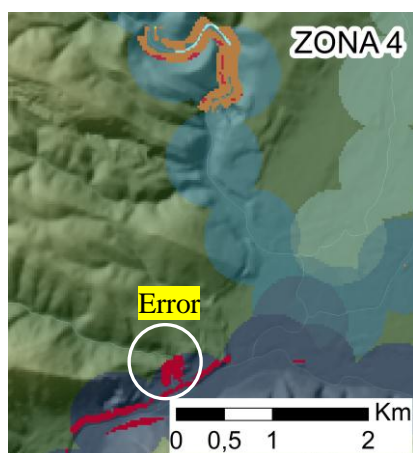
Interpretación de los resultados

En el caso de los resultados para la tecnología minihidráulica se han obtenido zonas (ampliadas en los mapas) que presentan una mayor viabilidad para acoger instalaciones de aprovechamiento hidroeléctrico.

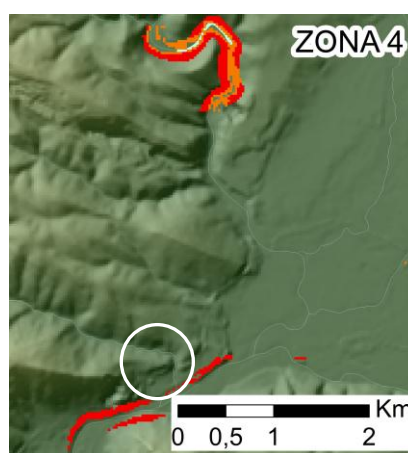
El resultado para esta energía renovable, además del objetivo de localización de zonas óptimas, está orientado a la comparativa entre los dos modelos de metodología desarrollados, puesto que si tienen similitud, el modelo de flujo acumulado podría ser exportable a zonas que tienen una información de aforos de caudales escasa o nula.

Podemos observar que los mapas si presentan parecido y que ambos coinciden en señalar las mismas zonas como las más adecuadas para la explotación de esta tecnología. Aunque se debe señalar, que en el modelo de caudales los valores de acogida no son tan altos como los que recoge el modelo de flujo acumulado para las mismas zonas.

También se debe considerar alguna diferencia, como la que se observa en la zona 4. En esta zona el modelo de caudal presenta una ubicación con alta capacidad de acogida, mientras que en el modelo de flujo acumulado este emplazamiento ni siquiera aparece. Esta diferencia se debe a un error en la interpolación de caudales, debida a la distancia de interpolación de 500 m establecida en este modelo, que convierte la zona de desagüe de un afluente al río Sil en un emplazamiento óptimo erróneo. En definitiva, que los datos de caudal en esa zona no corresponden al afluente en cuestión, sino al río Sil que en esa zona presenta un gran caudal.



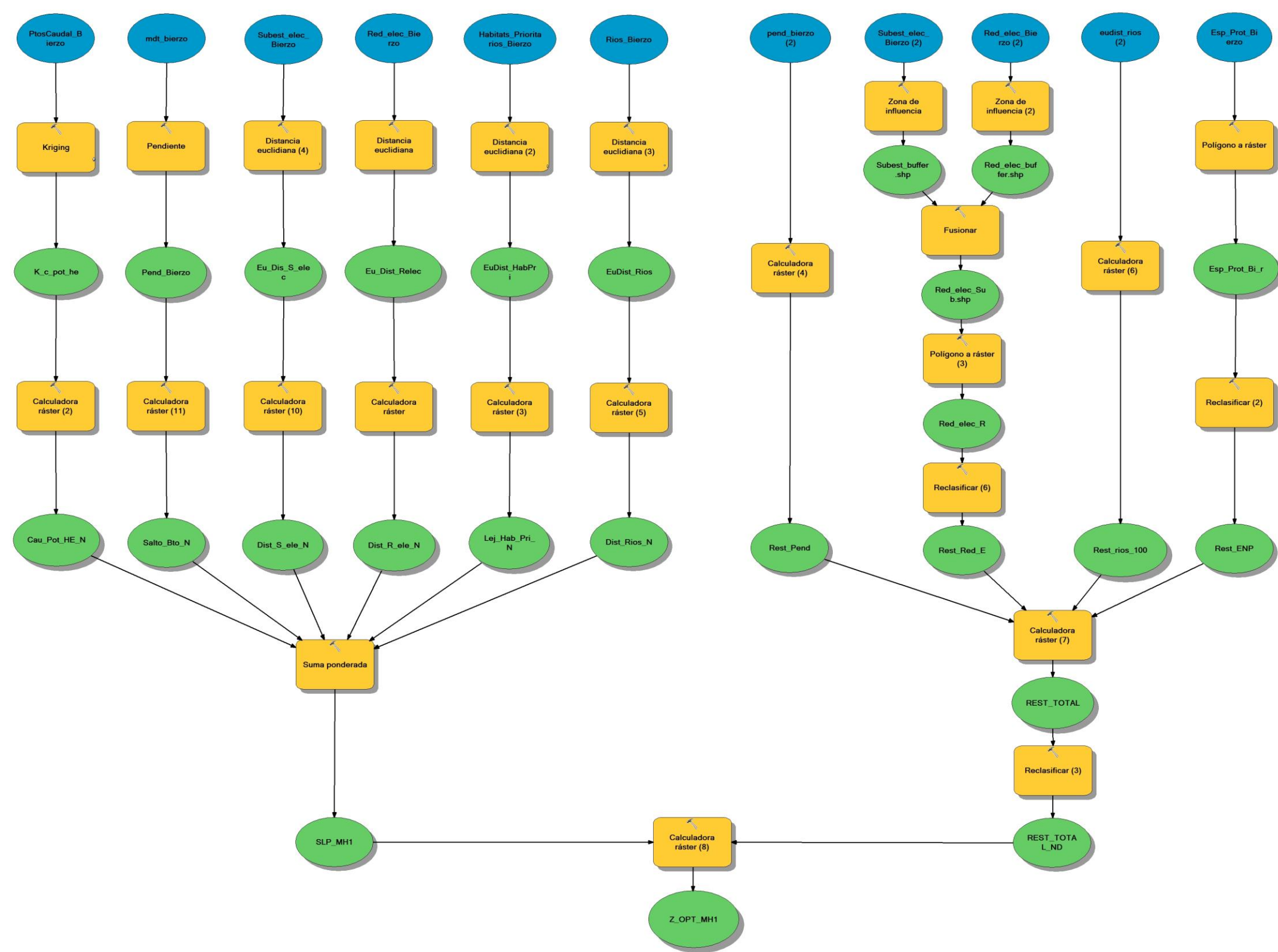
Modelo de caudal



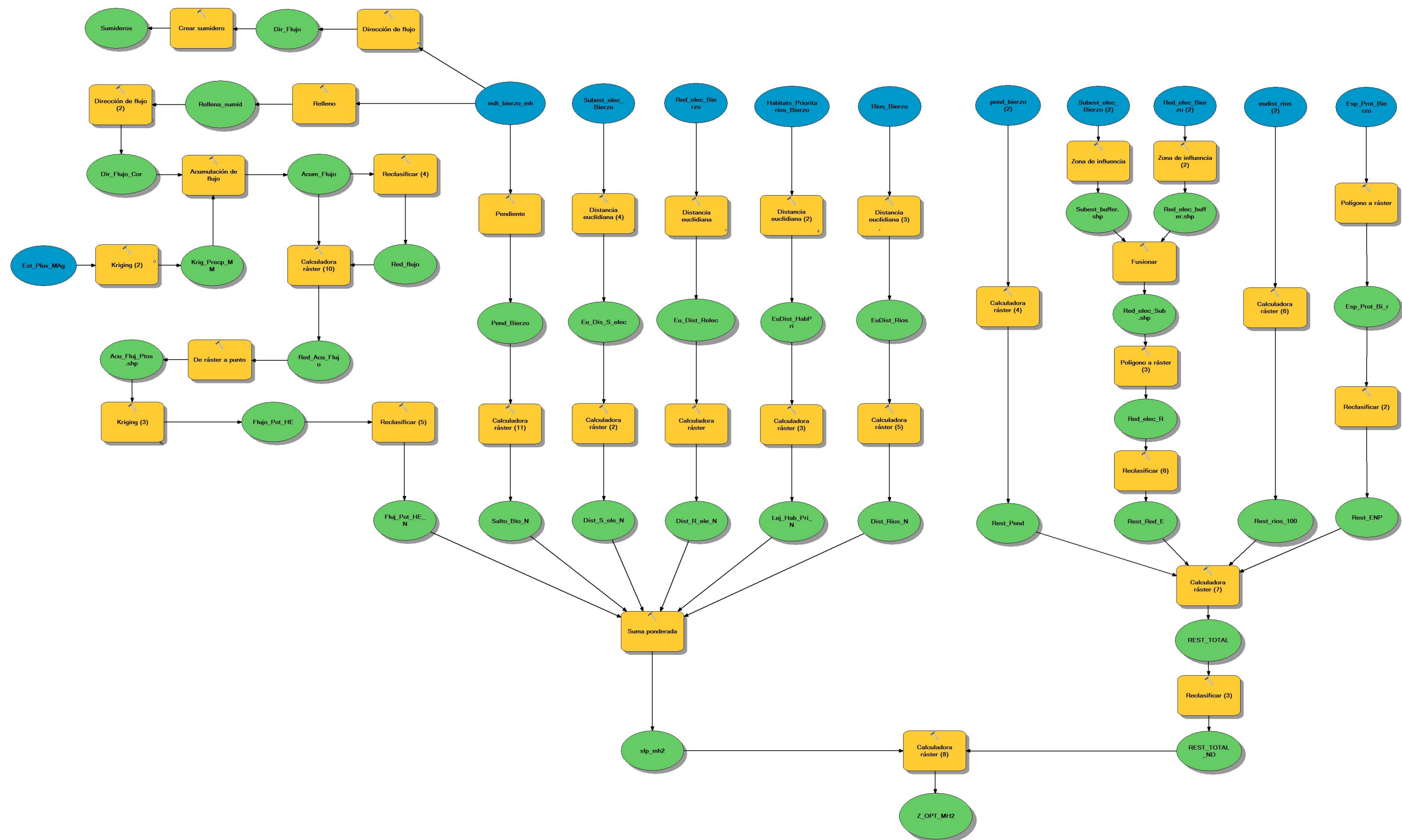
Modelo de Flujo Acumulado

6.2.8. Resumen de los Procesos de obtención de los Emplazamientos para Instalaciones de Minihidráulica

MODELO A PARTIR DE DATOS DE CAUDAL DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA MIÑO-SIL



MODELO A PARTIR DE DATOS DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL Y DEL MDT DE LA ZONA DE ESTUDIO



7. CONCLUSIONES

El principal objetivo del trabajo propuesto es la localización de zonas óptimas para la instalación de centrales de Biomasa Forestal y Minihidráulica. Ambas propuestas se han logrado a partir de una metodología de Evaluación Multicriterio implementada mediante el uso de diversas herramientas en un entorno SIG: Análisis Espacial, Análisis de Redes, Análisis Geoestadístico, Hidrología etc.

En el caso de la Biomasa, la aplicación de la metodología multicriterio ha proporcionado la obtención de cartografía de las zonas que presentan mayor aptitud para el aprovechamiento del recurso (biomasa forestal disponible) por un lado; y por otro, de las localizaciones idóneas para el emplazamiento de instalaciones de Biomasa Forestal. Estas dos salidas cartográficas han podido ser relacionadas mediante un análisis de redes, generando soluciones de localización-asignación que alcancen una distribución espacial eficaz.

La aplicación de análisis de redes en Biomasa mediante modelos de Localización-Asignación ha permitido la ubicación de instalaciones de modo que su suministro desde los puntos de demanda (biomasa disponible) sea más eficiente; permitiendo además, conocer las distancias de transporte exactas a través de la red viaria desde las instalaciones a las zonas de demanda del recurso. Estos modelos de localización-asignación pueden proporcionar otras soluciones introduciendo otras variables como por ejemplo, las instalaciones existentes de biomasa e incluso otras industrias como la maderera, que compiten por el mismo recurso.

En cuanto a la tecnología minihidráulica, se ha alcanzado el objetivo principal, que no es otro que la localización de zonas óptimas para la instalación de centrales para el aprovechamiento hidroeléctrico mediante el análisis multicriterio. Aunque la escasez de información relativa a datos de caudal, ha conducido a la búsqueda de otro modelo (flujo acumulado) para la obtención de este recurso, a partir de datos pluviométricos y del modelo digital del terreno mediante aplicaciones geoestadísticas (Método Kriging) y herramientas de hidrología. En este sentido, otro de los objetivos logrados ha sido contrastar los dos modelos de metodología desarrollados para evaluar su similitud. Ambos modelos presentan resultados parejos, lo que supone la posibilidad de exportar el modelo de flujo acumulado a zonas que tienen una información de aforos de caudales escasa o nula, atribuyendo un mayor ámbito de aplicación a este modelo.

Finalmente, se puede afirmar que los SIG pueden ser una herramienta determinante para la caracterización de las fuentes o recursos energéticos y para la localización óptima de instalaciones que aprovechen esos recursos. En consecuencia, los SIG permiten realizar análisis para la obtención de cartografía del recurso energético y conseguir un primer acercamiento a los trabajos de localización.

8. BIBLIOGRAFÍA

COITF (2011) «Principales obstáculos y retos para el desarrollo comercial de la biomasa forestal». Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Forestales. Sevilla.

Domínguez, J. (2000). «Análisis de la producción potencial de energía con Biomasa en la región de Andalucía (España) utilizando Sistemas de Información Geográfica».

Domínguez, J. (2002). «Los Sistemas de Información Geográfica en la Planificación e Integración de Energías Renovables» [Libro]. - Madrid : CIEMAT, 2002. - Vol. I.

ESHA (2006). «Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica». *European Small Hydropower Association*.

EEA (2006). «How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?» *European Environment Agency. Copenhagen*.

Esteban, L.S., García, R., Cabezón, R., Carrasco, J.E. (2008). «Plan de Aprovechamiento Energético de la Biomasa en las comarcas de El Bierzo y Laciana (León) ». Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER) perteneciente al Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

Esteban, L.S., García, R., Carrasco, J. (2008). «*Biomass Resources and Costs in Spain and Southern EU Countries. Towards a Common Methodology and Assessment*», en Schmid, J., Grimm, H.P., Helm, P. y Grassi, A. (Ed.): *Proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition. Florence, ETA-Renewable Energies*.

Garañeda, R.J. y Bengoa, L. (2005) «Estudio de disponibilidad de biomasa en seis zonas de Castilla y León», en S.E.C.F. (Ed.): *La ciencia forestal: respuestas para la sostenibilidad*. 4º Congreso Forestal Español. Zaragoza, Sociedad Española de Ciencias Forestales, (CD-Rom).

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011). «Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección», *GeoFocus (Artículos)*, Nº 11.

IFN-2 (1986-1996). «Segundo Inventario Nacional Forestal». Ministerio de Medio Ambiente. Edit. Dirección General de Conservación de la Naturaleza.

IDAE (2005). «Energía de la biomasa». Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

IDAE (2007). «Energía de la biomasa». Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Jarabo Friedrich, F. (1999). «La energía de la biomasa». Madrid, S.A.P.T. Publicaciones Técnicas.

López-Rodríguez F., Atanet C.P., Blázquez F.C., Celma A.R. (2009). «*Spatial assessment of the bioenergy potential of forest residues in the western province of Spain, Caceres*».

Lorente, J.M. (2009). «Situación energética y sector forestal: un análisis desde la perspectiva aragonesa», Foresta.

MFE50 (2007) «Mapa Forestal de España». Banco de Datos de la Naturaleza, Ministerio de Medio Ambiente.

Montero, G., Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. (2005). «Producción de biomasa y fijación de CO₂ en los bosques españoles». Monografías INIA, Nº 13.

Velázquez, B. (2006). «Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética», Ecosistemas.